VISIT…

62
К72

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.В. Костерев

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ

Учебное пособие

Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений

ЧЕБНЫЙ ФОНД
Б-КИ МИФИ

Москва 2008

УДК 62-192(075)+621.039.58(075)
ББК 34.41я7
К72

Костерев В.В. **Надежность технических систем и управление риском:** учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008 – 280 с.

Изложены основы курса «Надежность технических систем и управление риском», читаемого студентам МИФИ. В пособии даются базовые понятия надежности, безопасности и риска. Приводятся методы оценки надежности; подробно рассмотрены вопросы анализа, оценки, управления риском, а также риск коммуникации. Вводится понятие приемлемого риска. Рассмотрены вопросы оптимизации риска, практической реализации методологии ALARA. Анализируются вопросы управления безопасностью и риском, обсуждаются критерии принятии решений. Значительное внимание уделено рассмотрению моделей для оценки риска – вероятностной, нечеткой и нечетко-вероятностной. Для нечетко-вероятностной модели предложен подход, позволяющий агрегировать нечеткую и вероятностную информации. Обсуждаются вопросы использования качественной информации для оценки риска.

Предназначено для студентов, бакалавров, магистров и аспирантов специальности «Радиационная безопасность человека и окружающей среды»; может быть полезна студентам, изучающим курс «Безопасность жизнедеятельности» и всем, кто интересуется проблемами оценки и управления риском.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы

Рецензент канд. физ.-мат. наук А.Н. Аверкин

ISBN 978-5-7262-0939-5 © Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5
Глава 1. Элементы теории надежности технических систем 7
1.1. Введение 7
1.2. Исторический обзор 8
1.3. Частота и вероятность 9
1.4. Агрегирование вероятностей. 11
1.5. Оценка надежности технических систем 14
1.5.1. Статические модели оценки надежности 14
1.5.2. Динамические модели оценки надежности 18
1.6. Методы оценки надежности 21
1.6.1. Метод упрощения сети (схемы) 21
1.6.2. Дерево отказов 22
1.6.3. Дерево событий 36
1.6.4. Дерево решений 39
1.6.5. Марковский анализ 42
1.6.6. Метод декомпозиции. 45
1.7. Методика изучения риска 48
1.8. Байесовские сети 54
Глава 2. Анализ, оценка и управление риском 65
2.1. Риск как неизбежное и необходимое условие развития. 65
2.2. Эволюция риска 67
2.3. Безопасность, опасность, риск 75
2.4. Технологии риска 79
2.4.1. Классификация риска 80
2.4.2. Восприятие риска 86
2.4.3. Анализ риска систем 86
2.4.4. Риски, обусловленные человеком 100
2.5. Последствия и тяжесть аварии 108
2.5.1. Аналитическая оценка ущерба 110
2.5.2. Здоровье населения и экологический ущерб 117
2.6. Фоновый уровень риска 123
2.7. Концепция приемлемого риска 129
2.8. Процедура ALARA 131
2.9. Управление безопасностью и риском 152
2.9.1. Основная формальная структура принятия решений 154
2.9.2. Оценочная функция 156
2.9.3. Классические критерии принятия решений 162
2.9.4. Производные критерии 165
2.9.5. Принятие решений при наличии риска 167
2.9.6. Гибкий критерий выбора решений 171
2.9.7. Использование нечетких моделей принятия решений 172
2.10. Страхование рисков 174

2.11. Риск экстремальных ситуаций 184
2.11.1. Введение 184
2.11.2. Многокритериальный анализ риска 189
2.12. Данные для оценки риска 204
2.12.1. Введение 204
2.12.2. Источники данных 205
2.12.3. Современные технологии анализа данных 208
2.12.4. Экспертные оценки 208
2.13. Риск, связанный с облучением ионизирующим излучением 221
2.14. Риск-коммуникации 223
Глава 3. Математические модели оценки риска 230
3.1. Введение 230
3.2. Математические основы для описания неопределенности 230
3.3. Случайность и нечеткость 233
3.4. Статистика и случайные процессы 235
3.5. Виды неопределенности 236
3.6. Информация для оценки риска 238
3.7. Нечетко-вероятностные модели оценки риска 240
3.7.1. Вероятностные модели 240
3.7.1.1. Формальное описание риска в вероятностных моделях 240
3.7.2. Нечеткие модели 243
3.7.2.1. Понятие нечёткого множества 244
3.7.2.2. Основные операции над нечёткими множествами 246
3.7.2.3. Базовые сведения о триангулярных нормах. 248
3.7.2.4. Принцип расширения 251
3.7.2.5. Формальное описание риска в нечетких моделях 254
3.7.2.6. Использование качественной информации в оценке риска 258
3.7.3. Нечетко-вероятностные модели 262
3.7.4. Оценка риска с использованием лингвистических переменных 267
Список литературы 273

ПРЕДИСЛОВИЕ

Анализ и управление риском являются предметом возрастающего интереса индивидуумов, организаций и общества в целом. Риск – неотъемлемая черта любой человеческой деятельности. Управленцы самых разных областей деятельности включают методы анализа риска в процесс принятия решений. Использование риск анализа в различных дисциплинах привело к всемерному развитию теории, методологии и практических приложений. При этом вновь приходит понимание того, что чем больше мы знаем о сложном предмете, тем яснее то, как много еще неизвестно.

Сложность анализа и управления риском во многом обусловлена тем, что данная предметная область является междисциплинарной. Как следствие, риск предполагает наличие различных концепций и мер, и до настоящего времени не существует унифицированного подхода к проблеме управления риском. Кроме того, анализ и управление риском осуществляются в условиях неопределенностей, пронизывающих фактически все аспекты нашей жизни. И, наконец, ситуация осложняется тем, что на практике, как правило, приходится искать решения многокритериальных задач (что уже само по себе представляет сложную проблему) при наличии риска.

Известно, что в условиях незнакомой местности лучше иметь хотя бы приблизительную и неполную карту, чем не иметь вообще никакой. Применительно к задачам оценки риска это означает, что неполная, неопределенная, фрагментарная, противоречивая информация и, даже, отсутствие количественной информации не могут служить поводом для отказа от проведения оценок риска. Более того, чем меньше информации мы имеем о системе, тем важнее для нас оценка риска, с ней связанного, и управление этим риском.

В данном учебном пособии не делается попытка объять необъятное, т.е. исчерпывающим образом осветить проблемы, связанные с риском – это предмет монографий, однако дается общее представление о надежности технических систем, безопасности, риске,

моделях оценки риска, принципах оптимизации и управления риском.

В пособие включен оригинальный материал, полученный автором в процессе работы в течение ряда лет в рамках персональных грантов Минобразования, проектов Минатома-Минобразования, а также проектов МНТЦ. Это, прежде всего, вопросы, связанные с разработкой нечетко-вероятностных моделей оценки риска, базирующихся как на теории вероятностей, так и на теориях, в основе которых лежит теория нечетких множеств, и методов агрегирования информации случайной и нечеткой природы для задач оценки риска.

Значительное место в современном мире занимают вопросы управления безопасностью и риском. При этом управление риском является составной частью общей проблемы управления. Поэтому методы принятия решений являются важным компонентов в задачах риска. Особенно это касается многокритериальных задач, ситуаций с большой неопределенностью в данных.

Использование современного математического аппарата и вычислительных технологий на его базе позволяют получать адекватные оценки риска и, соответственно, принимать более эффективные решения, соответствующие оптимальным значениям риска.

Глава 1

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Надежность все больше и больше становится важнейшим требованием к инженерным системам, так как наша жизнь больше чем когда-либо зависит от удовлетворительного функционирования этих систем. Примеры таких систем – компьютеры, поезда, автомобили, самолеты и космические спутники. Некоторые факторы подчеркивают важность надежности разрабатываемых систем, включают сложность систем, усовершенствование, увеличение числа судебных процессов, связанных с качеством; общественное давление, высокую стоимость, прошлые отказы (аварии) систем и потерю престижа. По некоторым оценкам, стоимость проверки качества составляет приблизительно 7-10 % от полного коммерческого дохода изготовителей.

Сегодня надежность стала важнейшей проблемой, потому что каждый год очень большое число людей умирает и серьезно травмируется в результате несчастных случаев, связанных с техническими устройствами. Например, в США в 1996 году согласно Совету национальной безопасности было зарегистрировано 93400 смертных случаев и большое число травмированных в результате несчастных случаев. Общий ущерб от этих несчастных случаев оценивается приблизительно в 121 млрд. $.

Миллиарды долларов тратятся ежегодно, чтобы произвести новые изделия с использованием современных технологий. Многие из этих изделий очень сложны и состоят из миллионов деталей. Например, Боинг-747 содержит приблизительно 4.5 миллионов деталей, включая застежки. Надежность, качество и безопасность таких систем важны, как никогда.

1.2. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

В начале 60-х прошлого годов века анализ безопасности базировался на эмпирических методах, а термин *надежность* имел весьма ограниченное применение [1]. Толчок для создания численных методов оценки надежности был дан авиационной индустрией. В частности, увеличение интенсивности полетов и авиационных катастроф привело к необходимости выработки критериев надежности и требований к безопасности. Так, было установлено, что одна катастрофа приходится в среднем на 1 миллион посадок. Следовательно, для создаваемых автоматических систем посадок допустимым можно было принять частоту в одну катастрофу на 10 миллионов посадок.

В США в 40-х годах прошлого века основные усилия по повышению надежности были сосредоточены на улучшении качества. Разнообразные меры были направлены на увеличение долговечности машин: совершенствование конструкций, повышение прочности материалов, чистоты обработки, улучшение потребительских качеств измерительных инструментов. Например, фирма «Дженерал моторс» увечила ресурс двигателей локомотивов в четыре раза за счет улучшенной изоляции и применения усовершенствованных подшипников.

В 50-е годы министерство обороны США обнародовало информацию о том, что годовая стоимость обслуживания вооружения составляет 2$ на 1$ его стоимости. То есть, за 10 лет эксплуатации вооружения стоимостью 1 млн. $ потребуется 20 млн. $ на его содержание. Это показало целесообразность мероприятий по повышению надежности конструкций еще на стадии проектирования. В эти же годы было положено начало разработке методов количественной оценки «человеческого фактора» – оценки вклада ошибок человека в аварийность систем «человек – машина». Частота ошибок человека в зависимости от условий составила 0.01 – 0.02. Это позволило в дальнейшем учитывать человеческие ошибки при проведении оценок надежности.

В 60-е годы в связи с развитием космической техники назрела необходимость в новых методах повышения надежности. Основные усилия были сосредоточены на последствиях отказов различных элементов в системах. В 1961 году Х.А. Уотсон из «Белл телефоун» предложил метод анализа надежности с использованием дерева отказов для систем управления межконтинентальными ракетами «Минитмен». В дальнейшем Д.Ф. Хаасль развил эту методику для широкого круга технических проблем, относящихся к надежности. В 1966 году министерство обороны США приняло стандарты и ввело требования по проведению анализа надежности всех видов вооружений. В эти же годы стали широко издаваться книги и журналы, посвященные надежности. Все это привело к накоплению и систематизации данных по параметрам элементов, систем и ошибок человека.

70-е годы ознаменовались интенсивными работами в области оценок риска для атомных электростанций. Они ознаменовались выходом в 1977 году работы «WASH-1400. Анализ безопасности реактора». Руководимая профессором Н. Расмуссеном группа исследователей проанализировала возможные аварии в атомной энергетике, провела их классификацию в зависимости от вероятности появления и оценила потенциальные последствия в отношении населения. Использованные в этом отчете деревья отказов, деревья событий и методы оценки риска стали применяться и в других отраслях промышленности.

Возрастание индустриальных опасностей для человека и окружающей среды, и рост в связи с этим озабоченности населения привели к принятию в развитых странах ряда законов, предписывающих проведение исследований источников риска перед началом строительства предприятий. Принятие в США законов об охране здоровья на производстве привело к увеличению расходов в 1977 году только в химической промышленности на 2 млрд. $.

1.3. ЧАСТОТА И ВЕРОЯТНОСТЬ

Частота с размерностью «в единицу времени» в диапазоне от ноля до бесконечности означает число появлений событий в (единичном) временном интервале. *Вероятность* безразмерна, изменяется от ноля до единицы и имеет различные определения. Путаница между частотой и вероятностью является результатом потребности

определить вероятность отказа в течение конкретного промежутка времени, например, в течение года. Такое вычисление вероятности явно рассматривает временной интервал и, следовательно, является частотой. Однако необходимо проявлять значительную осторожность, чтобы гарантировать, что вычисления правильны по размерности и удовлетворяют соответствующей алгебре.

Ниже приводятся три интерпретации значения вероятности:

1. Вероятность Лапласа.

$$Вероятность = \frac{Число\ реализаций\ события}{Общее\ число\ реализаций} \qquad (1.1)$$

Выражение (1.1) представляет значение вероятности по Лапласу. Оно справедливо, когда число событий счетное и каждый результат одинаково вероятен, например, «правильная» игральная кость при подбрасывании имеет равную вероятность упасть на любую из шести граней.

При бросании двух игральных костей число вариантов с выпадением «три» равно двум: 1 и 2 или 2 и 1. Общее число возможных вариантов для двух игральных костей равно 6×6=36. Следовательно, вероятность того, что сумма будет равна трем, составляет 2/36=1/18.

Недостатком подобного определения вероятности является то, что оно ограничено вычислением вероятностей процессов, для которых все исходы известны и равновероятны. Это ограничивает ее использование для определения вероятности аварий систем.

2. Вероятность von Misesian. Эта вероятность определяется из эксперимента путем деления числа результатов определенного типа N на общее число испытаний N_Σ:

$$Вероятность = \lim_{\lim N_\Sigma \to \infty} \frac{N}{N_\Sigma} \qquad (1.2)$$

Когда N_Σ стремится к бесконечности, отношение в (1.2) стремится к вероятности. Преимуществом этого типа вероятности является то, что она дает верный результат и в случае дефектной игральной кости (с неравновероятностными исходами). Ее используют для определения вероятностей аварий, но она может быть плохой аппроксимацией, если число испытаний невелико. На практике этот вариант, как правило, и реализуется, поэтому вероятность имеет неопределенность, связанную с ограниченным числом испытаний. Этот тип вероятности часто называют *частотным определением вероятности,* хотя она не имеет размерности «в единицу времени». Размерность следует из того факта, что N_Σ соотносится с интервалом времени. При очень большом числе испытаний *вероятность* von Misesian приближается к *вероятности* Лапласа.

3. Вероятность как мера доверия. Существует мнение, что все вероятности являются условными вероятностями. В примере с игральной костью, вероятность является условной, так как предполагается, что кость идеальна и способ бросания не влияет на результат. Некоторые авторы утверждают, что вероятность связана с мерой доверия (знания, как правило, неопределенны). Вероятность в этом смысле включает в себя всю информацию, которая связана с конкретным событием. Подобная информация может быть представлена как распределение, высота которого пропорциональна уверенности в событии, а ширина отражает неопределенность. Подробнее о вероятностной мере как частном случае нечетких мер поговорим позднее.

1.4. АГРЕГИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Пересечение или умножение.

Если эксперимент заключается в появлении событий A и/или B, вероятность появления события A есть $P(A)$, а вероятность появления событий A и B одновременно есть $P(A \times B)$, то условная вероятность появления события B (при условии, что событие A произошло) есть

$$P(B|A) = P(A \times B) / P(A), \quad (1.3)$$

откуда

$$P(A \times B) = P(B|A) \times P(A). \quad (1.4)$$

Если A и B независимы

$$P(A \times B) = P(B) \times P(A). \quad (1.5)$$

В общем случае, правило агрегирования вероятностей в случае пересечения событий есть умножение вероятностей

$$P(A \times B \times \ldots \times F) = P(A) \times P(B) \times \ldots \times P(F), \quad (1.6)$$

или

$$P(\prod_{i=1}^{N} A_i) = \prod_{i=1}^{N} P(A_i). \quad (1.7)$$

Объединение или сложение.

Если события не могут появиться одновременно, они называются несовместными. Для таких событий

$$P(A+B) = P(A) + P(B) \quad (1.8)$$

или

$$P(\sum_{i=1}^{N} A_i) = \sum_{i=1}^{N} P(A_i). \quad (1.9)$$

Если два события могут быть совместными,

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B). \quad (1.10)$$

Для трех событий, которые могут быть совместными,

$$P(A+B+C)=P(A)+P(B)+P(C)-P(A)\times P(B)-P(A)\times P(C)-$$
$$-P(B)\times P(C)+P(A)\times P(B)\times P(C). \quad (1.11)$$

В общем случае N совместных событий

$$P(\sum_{i=1}^{N} A_i) = \sum_{i=1}^{N} P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i, A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i, A_j, A_k)$$
$$- \ldots + (-1)^{N-1} \prod_{i=1}^{N} P(A_i). \quad (1.12)$$

Диаграммы Венна.

Диаграммы Венна позволяют наглядно представить основные операции над множествами. На рис. 1.1 приведен пример диаграмм Венна.

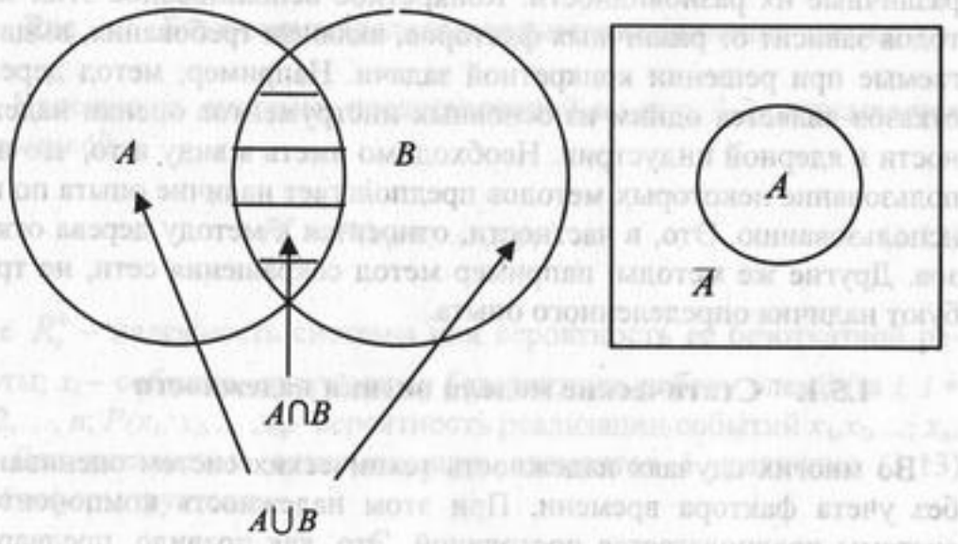


Рис. 1.1. Примеры диаграмм Венна

Кругами обозначены множества A и B. Заштрихованная область представляет пересечение этих множеств. Объединению множеств соответствует вся область, включающая как множество A, так и множество B. Прямоугольник в правой части рисунка обозначает дополнение множества A.

1.5. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Под надежностью элемента (системы) будем понимать вероятность выполнения заданных функций в заданных условиях в течение заданного периода времени.

Оценка надежности обычно начинается на стадии проектирования. За последние годы были развиты различные методы оценки надежности. Условно можно выделить два класса моделей: статические и динамические. Ниже дан краткий обзор этих двух классов. Затем рассмотрены основные методы оценки надежности, используемые на практике. К ним относятся: метод дерева отказов, метод дерева событий, Марковский метод, метод таблиц решений, метод сокращения сети, анализ видов отказов и последствий, анализ критичности, предварительный анализ опасности и другие, а также различные их разновидности. Конкретное использование этих методов зависит от различных факторов, включая требования, выдвигаемые при решении конкретной задачи. Например, метод дерева отказов является одним из основных инструментов оценки надежности в ядерной индустрии. Необходимо иметь в виду и то, что использование некоторых методов предполагает наличие опыта по их использованию. Это, в частности, относится к методу дерева отказов. Другие же методы, например метод сокращения сети, не требуют наличия определенного опыта.

1.5.1. Статические модели оценки надежности

Во многих случаях надежность технических систем оценивают без учета фактора времени. При этом надежность компонентов системы предполагается постоянной. Это, как правило, предварительный или элементарный анализ. Надежности системы при этом характеризуется блок-схемой. В свою очередь, блок-схема состоит

из многих блоков, представляющих подсистемы (части системы). Вероятность отказа или надежность системы оценивают путем оценки вероятности отказа (надежности) составляющих блоков. При этом вероятность отказа компонентов предполагается не изменяющейся со временем (постоянной). Обычно при таком типе анализа надежности считается, что компоненты отказывают независимо друг от друга. Ниже будут рассмотрены три типа соединений элементов, встречающихся на практике: последовательный, параллельный и типа моста.

Последовательное соединение элементов. Это соединение наиболее простое из всех соединений. Блок-схема системы с n последовательно соединенными элементами, приведена на рис. 1.2. Каждый блок представляет один компонент (элемент) системы. Если любой из элементов отказывает – отказывает система. Другими словами, все элементы системы должны работать для ее успешной работы.

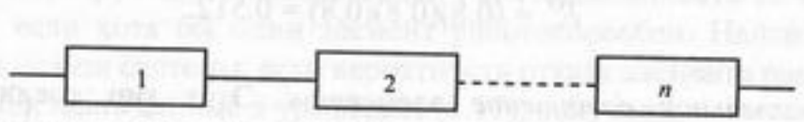


Рис. 1.2 Блок-схема последовательного соединения элементов

Надежность системы, представленной на рис. 1.2, описывается формулой

$$R_s^s = P(x_1, x_2, \ldots, x_n), \tag{1.13}$$

где R_s^s – надежность системы или вероятность ее безотказной работы; x_i – событие, означающее безотказную работу элемента i, $i = 1,2,\ldots, n$; $P(x_1, x_2, \ldots, x_n)$–вероятность реализации событий $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Для независимо отказывающих элементов i уравнение (1.13) трансформируется в

$$R_s^s = P(x_1) \cdot P(x_2) \cdot \ldots \cdot P(x_n), \tag{1.14}$$

где $P(x_i)$ – вероятность появления события i, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Обозначив $R_i = P(x_i)$, можно записать

$$R_s^s = \prod_{i=1}^{n} R_i, \qquad (1.15)$$

где R_i – надежность i-го элемента.

Иными словами, надежность элементов, соединенных последовательно, равна произведению надежностей элементов.

Пример 1.1.

Допустим, система состоит из трех независимых одинаковых элементов с надежностью $R_i = 0.8$, i=1, 2, 3. Если отказывает один из элементов, то система выходит из строя. Какова надежность системы? Подставив значения $R_i = 0.8$ в уравнение (1.15), получим

$$R_s^s = (0.8)(0.8)(0.8) = 0.512.$$

Параллельное соединение элементов. Этот тип соединения представляет систему элементов, функционирующих одновременно. При этом предполагается, что для нормальной работы системы должен работать хотя бы один элемент. Система n параллельно соединенных элементов представлена на рис. 1.3.

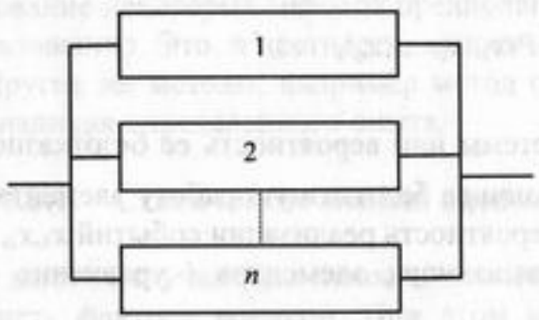


Рис. 1.3. Блок-схема параллельного соединения элементов

Вероятность отказа системы определяется как

$$P_s^p = P(x_1, x_2, \ldots, x_n), \qquad (1.16)$$

где x_i – событие, означающее отказ элемента, $i = 1,2,\ldots, n$;

$P(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ – вероятность появления событий $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Для независимо отказывающих элементов уравнение (1.16) можно переписать как

$$P_s^p = P(x_1)P(x_2)\ldots P(x_n), \qquad (1.17)$$

где $P(x_i)$–вероятность события x_i (отказа элемента i), i=1, 2, …, n.

Пример 1.2.

Система состоит из трех независимых идентичных элементов, функционирующих одновременно. Работоспособность ее сохраняется, если хотя бы один элемент работоспособен. Найти вероятность отказа системы, если вероятность отказа элемента равна 0.1.

Подставив данные в уравнение (1.17), получаем:

$$P_s^p = (0.1)(0.1)(0.1) = 0.001.$$

Соединение элементов типа моста. Этот вид соединения элементов встречается в различных приложениях. Блок-схема соединения приведена на рис. 1.4.

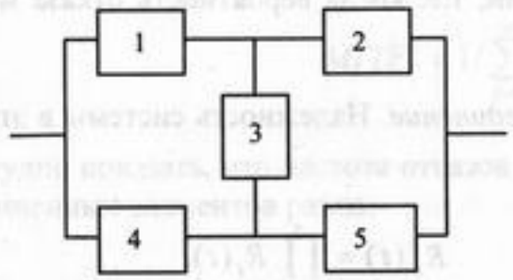


Рис. 1.4. Блок-схема соединения элементов типа моста

ЧЕБНЫЙ ФОНД
б-ки МИФИ

Для независимых элементов надежность системы выражается как

$$R_s^b = 2R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 + R_2 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_5 + R_1 R_4 + R_2 R_5 - R_2 R_3 R_4 R_5 - R_1 R_2 R_3 R_4 - R_5 R_1 R_2 R_3 - R_1 R_3 R_4 R_5 - R_1 R_2 R_4 R_5, \quad (1.18)$$

где R_i – надежность i-го элемента, $i = 1, 2, \ldots, 5$.

Для идентичных элементов

$$R_s^b = 2R^5 - 5R^4 + 2R^3 + 2R^2. \quad (1.19)$$

1.5.2. Динамические модели оценки надежности

В реальной жизни надежность объектов изменяется со временем. Другими словами, надежность объектов не является константой. На практике, на основе данных по аварийности объектов вычисляют среднее время до отказа (среднее время наработки на отказ) и частоту отказов. Среднее время до отказа может описываться различными моделями. В последнее время для этой цели использовались разные статистические распределения. Они включают распределения: экспоненциальное, Вейбулла, нормальное, гамма и распределение Rayleigh. Считается, что среднее время до отказа электронных компонентов приборов подчиняется экспоненциальному распределению, механических компонентов – Вейбулла. На практике наиболее широко используется экспоненциальное распределение по причине его простоты. Ниже мы рассмотрим оценку надежности систем при различных видах соединения элементов для динамической модели, т.е. когда вероятность отказа меняется со временем.

Последовательное соединение. Надежность системы в этом случае есть

$$R_s^s(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t), \quad (1.20)$$

где $R_s^s(t)$ – надежность системы последовательно соединенных элементов в момент времени t, $R_i(t)$ – надежность i-го элемента в момент времени t, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Для случая экспоненциального распределения среднего времени до отказа элемента i (т.е. постоянной частоты отказов)

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (1.21)$$

где λ_i – частота отказов элемента i.

Откуда

$$R_s^s(t) = e^{-\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t}. \quad (1.22)$$

Если $\lambda_i t$ много меньше единицы, уравнение (1.22) преобразуется в

$$R_s^s(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i t. \quad (1.23)$$

Последнее уравнение служит хорошей аппроксимацией, когда $\lambda_i t \le 0.05$.

Интегрируя уравнение (1.22) по времени от 0 до ∞, получаем для среднего времени до отказа $MTTF_s^s$ (Mean Time To Failure):

$$MTTF_s^s = 1 / \sum_{i=1}^{n} \lambda_i. \quad (1.24)$$

Нетрудно показать, что частота отказов системы последовательно соединенных элементов равна:

$$\lambda_s^s(t) = f_s^s(t) / R_s^s(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i, \quad (1.25)$$

где $f_s^t(t)$ – функция плотности вероятности (аварийности) системы.

Параллельное соединение. Для случая параллельного соединения элементов

$$R_s^p(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - R_i(t)]. \qquad (1.26)$$

При постоянной частоте отказов (экспоненциальное распределение времени до отказа)

$$R_s^p(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - e^{-\lambda_i t}). \qquad (1.27)$$

Для случая идентичных элементов $\lambda_i = \lambda$:

$$R_s^p(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n. \qquad (1.28)$$

При $\lambda_i t \le 0.05$ уравнение (1.26) преобразуется к виду

$$R_s^p(t) \approx 1 - \prod_{i=1}^{n} \lambda_i t. \qquad (1.29)$$

Если элементы идентичны,

$$R_s^p(t) \approx 1 - (\lambda t)^n, \qquad (1.30)$$

а среднее время до отказа

$$MTTF_s^p = (\sum_{i=1}^{n} 1/i)/\lambda. \qquad (1.31)$$

Соединение элементов типа моста. Для случая надежности, зависящей от времени, и идентичных элементов (см. рис. 1.4)

$$R_s^b(t) = 2e^{-5\lambda t} - 5e^{-4\lambda t} + 2e^{-3\lambda t} + 2e^{-2\lambda t}, \qquad (1.32)$$

где λ – частота отказов элемента.

Интегрируя это уравнение по времени от нуля до бесконечности, получаем для среднего времени до отказа

$$MTTF_s^s = 49/60\lambda. \qquad (1.33)$$

1.6. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

1.6.1. Метод упрощения сети (схемы)

Это один из самых простых методов оценки надежности системы, состоящей из подсистем: последовательно и параллельно соединенных элементов, а также соединений типа моста. Последовательно объединяя и уменьшая количество последовательных и параллельных подсистем можно свести сложную систему к гипотетической единице. Конфигурации типа моста также могут быть сведены к последовательно или параллельно соединенным подсистемам с использованием различных методов разложения. Главное преимущество этого подхода состоит в том, что он прост в понимании и легко применим. Продемонстрируем метод на следующем примере.

Пример 1.3.

Схема рис. 1.5, представляет собой систему с независимыми элементами – каждый блок есть отдельный элемент. Надежности R_i элементов для i = 1, 2, …, 5 приведены здесь же. Определим надежность системы с использованием метода упрощения.

Во-первых, выделим подсистемы *A*, *B* и *C* как показано на рис. 1.5,а. Подсистема *A* включает элементы *1* и *2*, соединенные после-

довательно. Заменяем их одним гипотетическим элементом с надежностью

$$R_A = R_1 \cdot R_2 = (0.4)\cdot(0.5) = 0.2,$$

где R_A – надежность подсистемы А.

Таким образом, подсистема *A* упрощается до единственного гипотетического элемента, имеющего надежность 0.2. Соответственно, упрощенная схема приведена на рис. 1.5,б. Левая часть системы содержит два элемента: *A* и *3*, соединенных параллельно. Упростим подсистему *C*, сведя ее к одному гипотетическому элементу следующим образом:

$$R_C = 1 - (1 - R_A)\cdot(1 - R_3) = 1 - (1 - 0.2)\cdot(1 - 0.3) = 1 - 0.56 = 0.44.$$

Аналогичным образом упростим подсистему *B*:

$$R_B = 1 - (1 - R_4)\cdot(1 - R_5) = 1 - (1 - 0.6)\cdot(1 - 0.5) = 1 - 0.2 = 0.8$$

Соответствующая упрощенная схема приведена на рис. 1.5,в.

Таким образом, система упростилась до двух гипотетических элементов *B* и *C*, соединенных последовательно. Надежность этой системы *S* определяется как

$$R_S = R_B \cdot R_C = (0.8)\cdot(0.44) = 0.352.$$

Таким образом, исходная схема из пяти элементов упрощена до одного гипотетического элемента с надежностью R_S, которая равна надежности исходной сети.

1.6.2. Дерево отказов

Метод анализа с использованием дерева отказов был разработан в лаборатории «Белл телефон» Х.А. Уотсоном в 1961-1962 годах. Деревья отказов являются сложными логическими структурами. Для их построения и количественного анализа необходимы знания булевой алгебры, теории множеств и других разделов математики.

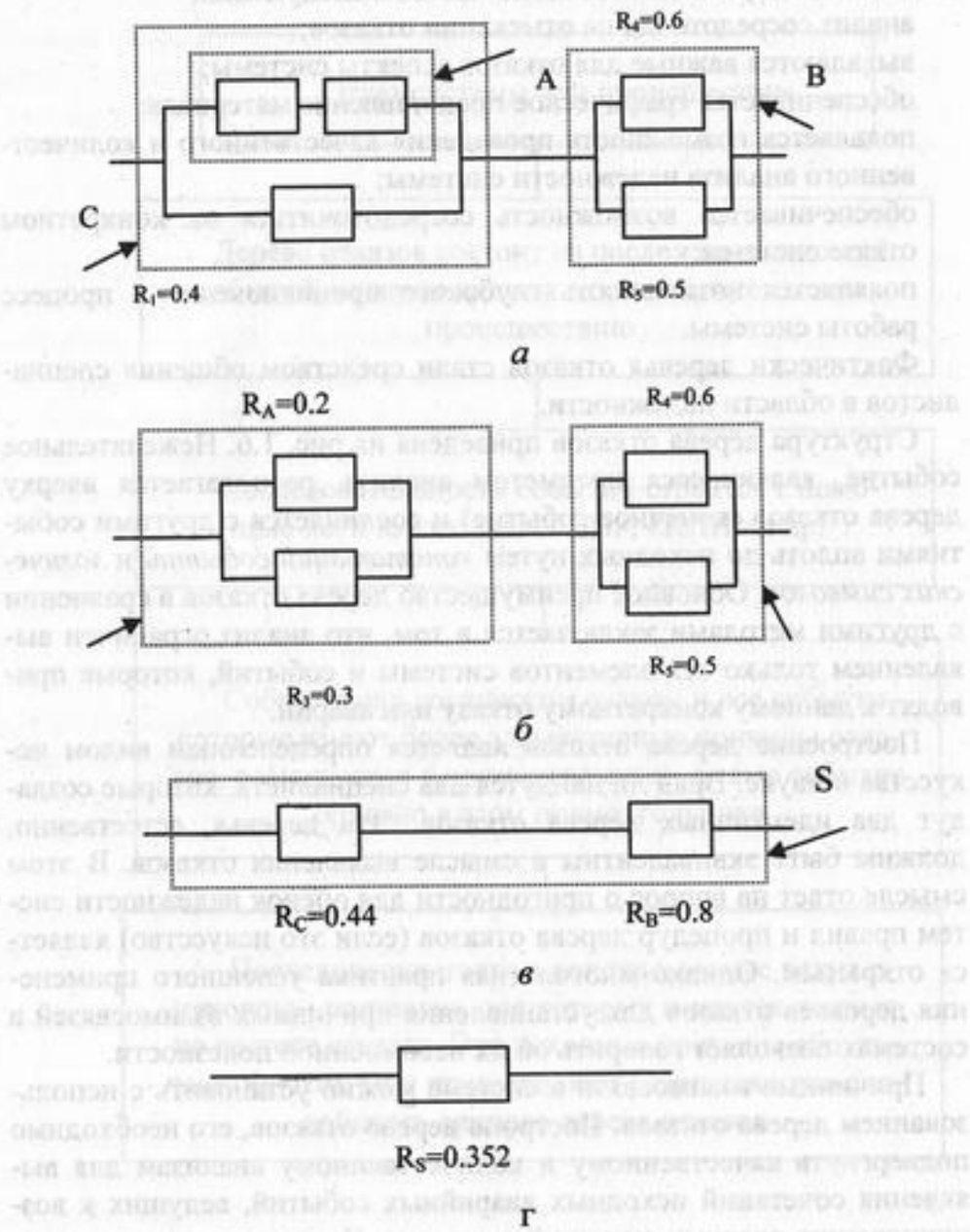


Рис. 1.5. Определение надежности системы путем упрощений

Полезность дерева отказов заключается в следующем:

анализ сосредоточен на отыскании отказов;

выявляются важные для отказов аспекты системы;

обеспечивается графическое представление материала;

появляется возможность проведения качественного и количественного анализа надежности системы;

обеспечивается возможность сосредоточиться на конкретном отказе системы;

появляется возможность глубокого проникновения в процесс работы системы.

Фактически деревья отказов стали средством общения специалистов в области надежности.

Структура дерева отказов приведена на рис. 1.6. Нежелательное событие, являющееся предметом анализа, располагается вверху дерева отказов (конечное событие) и соединяется с другими событиями вплоть до исходных путем *констатаций событий* и *логических символов*. Основное преимущество дерева отказов в сравнении с другими методами заключается в том, что анализ ограничен выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу или аварии.

Построение дерева отказов является определенным видом искусства в науке. Вряд ли найдутся два специалиста, которые создадут два идентичных дерева отказов. Эти деревья, естественно, должны быть эквивалентны в смысле выявления отказов. В этом смысле ответ на вопрос о пригодности для оценок надежности систем правил и процедур дерева отказов (если это искусство) является открытым. Однако многолетняя практика успешного применения деревьев отказов для установления причинных взаимосвязей в системах позволяет говорить об их несомненной полезности.

Причинные взаимосвязи в системе можно установить с использованием дерева отказов. Построив дерево отказов, его необходимо подвергнуть качественному и количественному анализам для выявления сочетаний исходных аварийных событий, ведущих к возникновению опасных ситуаций в системе. После того, как эти сочетания выявлены, система может быть модернизирована и потенциальные опасности уменьшены.

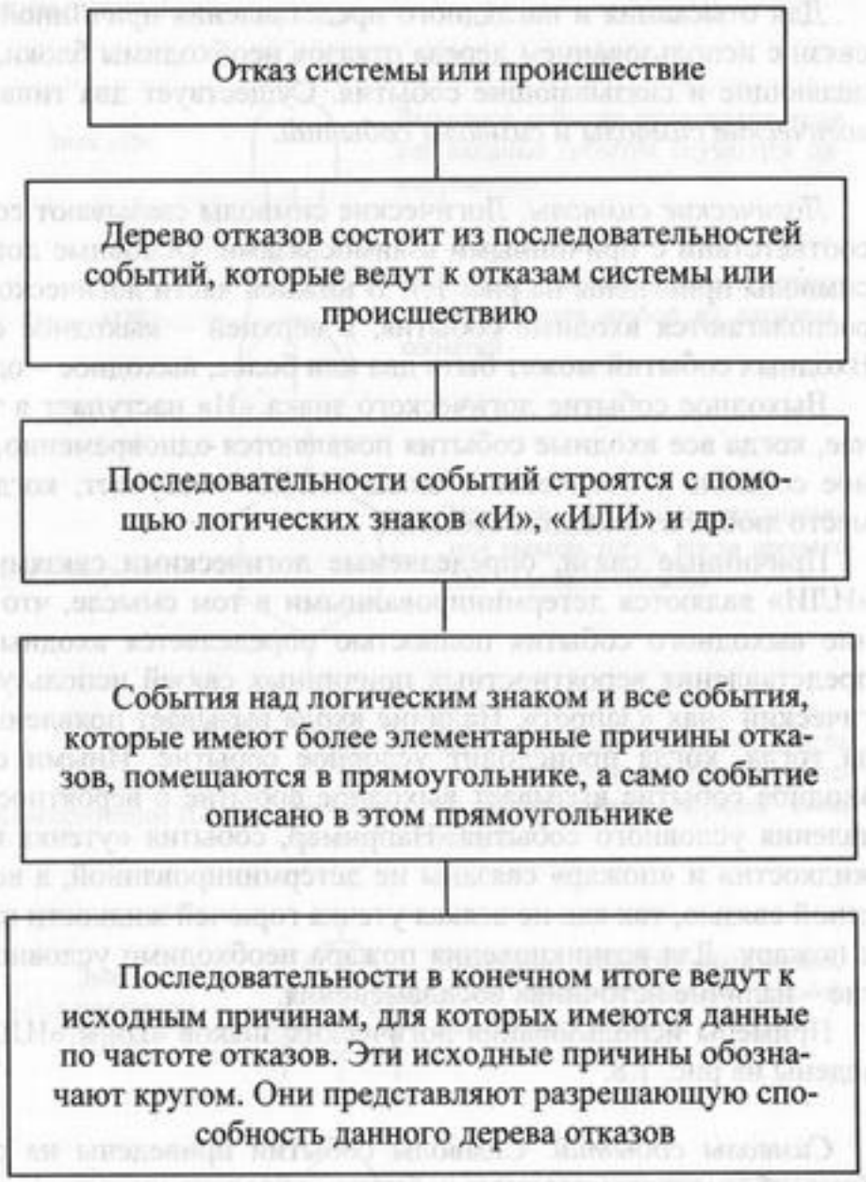


Рис. 1.6. Основная структура дерева отказов

Основные блоки дерева отказов

Для отыскания и наглядного представления причинной взаимосвязи с использованием дерева отказов необходимы блоки, подразделяющие и связывающие события. Существует два типа блоков: *логические символы* и *символы событий*.

Логические символы. Логические символы связывают события в соответствии с причинными взаимосвязями. Основные логические символы приведены на рис. 1.7. В нижней части логического знака располагаются входные события, в верхней – выходное событие. Входных событий может быть два или более, выходное – одно.

Выходное событие логического знака «И» наступает в том случае, когда все входные события появляются одновременно. Выходное событие у логического знака «ИЛИ» наступает, когда имеет место любое из входных событий.

Причинные связи, определяемые логическими связями «И» и «ИЛИ» являются детерминированными в том смысле, что появление выходного события полностью определяется входными. Для представления вероятностных причинных связей используется логический знак «Запрет». Наличие входа вызывает появление выхода тогда, когда происходит условное событие. Иными словами, входное событие вызывает выходное событие с вероятностью появления условного события. Например, события «утечка горючей жидкости» и «пожар» связаны не детерминированной, а вероятностной связью, так как не всякая утечка горючей жидкости приводит к пожару. Для возникновения пожара необходимо условное событие – наличие источника воспламенения.

Примеры использования логических знаков «И» и «ИЛИ» приведены на рис. 1.8.

Символы событий. Символы событий приведены на рис. 1.9. Круг обозначает исходное событие, обеспеченное достаточными данными, т.е. по которому есть данные по вероятности отказов. Ромб – событие недостаточно детально разработанное, т.е. не обеспеченное данными по вероятности отказов. Прямоугольник – событие, которое вводится логическим элементом, т.е. описываемое в

этом прямоугольнике. Овал – условное событие, используемое с логическим знаком

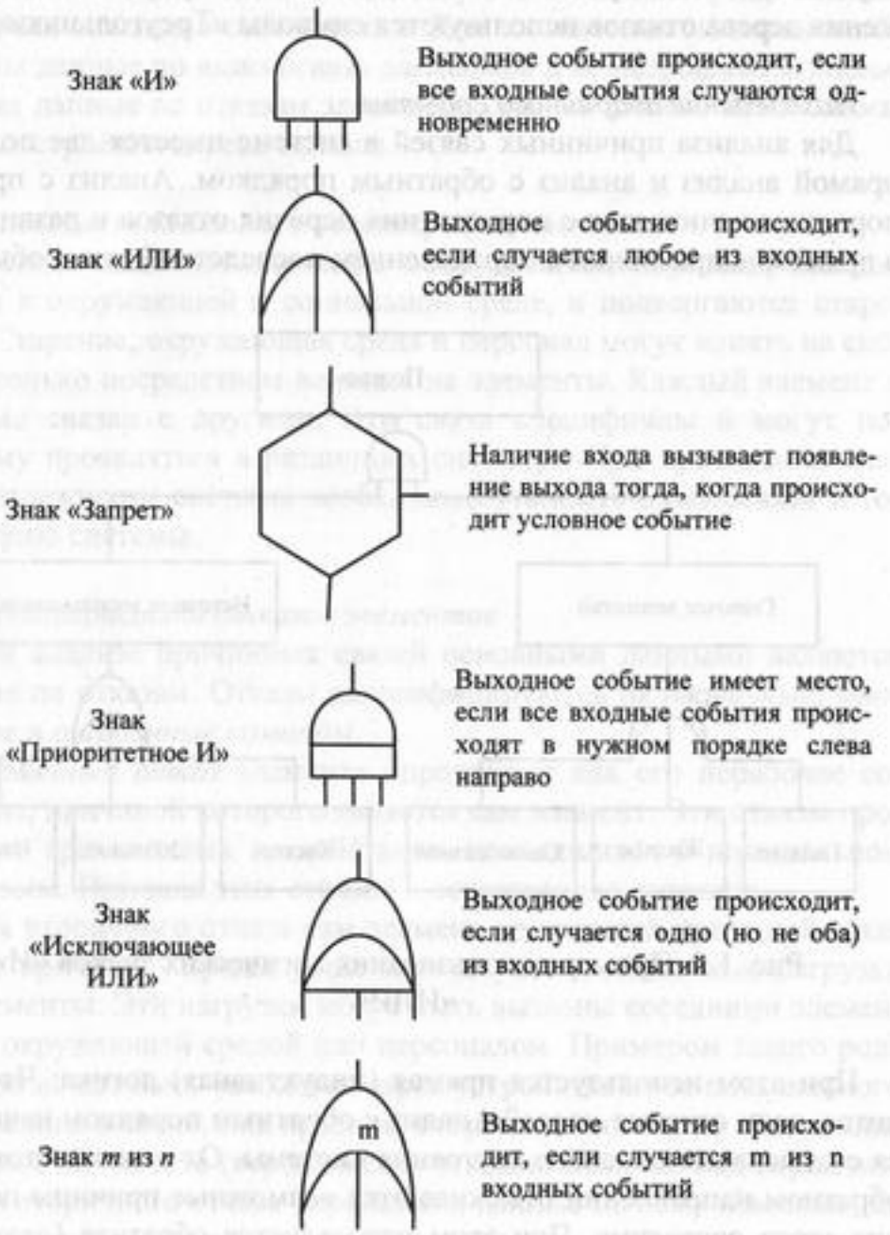


Рис. 1.7. Логические символы

«Запрет». Для описания события, которое может случиться или не случиться, используется символ «Домик». Для упрощения изображения дерева отказов используются символы «Треугольники».

Нахождение аварийного события

Для анализа причинных связей в системе имеется два подхода: прямой анализ и анализ с обратным порядком. Анализ с прямым порядком начинается с определения перечня отказов и развивается в прямом направлении с определением последствий этих событий.

Рис. 1.8. Пример использования логических знаков «И» и «ИЛИ»

При этом используется прямая (индуктивная) логика: Что случится, если откажет насос? Анализ с обратным порядком начинается с отыскания опасного состояния системы. От этого состояния в обратном направлении отыскиваются возможные причины появления этого состояния. При этом используется обратная (дедуктивная) логика: «Каким образом может отказать система?». Характерным примером использования прямого подхода является построе-

ние дерева событий. Обратного – дерева отказов. При выполнении анализа в прямом порядке принимается набор последовательностей событий и составляются соответствующие им сценарии, оканчивающиеся опасными состояниями. Для составления сценария необходимы данные по *взаимосвязи элементов* и *топографии системы,* а также данные по отказам элементов. Эти же данные необходимы и для построения дерева отказов.

Взаимосвязи элементов и топография системы

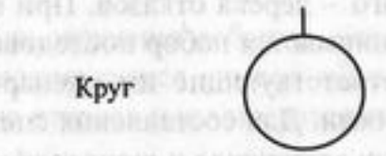
Система включает элементы оборудования, персонал, находящиеся в окружающей и социальной среде, и подвергаются старению. Старение, окружающая среда и персонал могут влиять на систему только посредством влияния на элементы. Каждый элемент в системе связан с другими. Эти связи специфичны и могут поразному проявляться в различных системах. При проведении анализа надежности системы необходимо уточнить взаимосвязи и топографию системы.

Характеристики отказов элементов

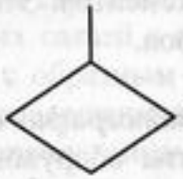
При анализе причинных связей основными данными являются данные по отказам. Отказы классифицируются на *первичные*, *вторичные* и *ошибочные команды*.

Первичный отказ элемента определяют как его нерабочее состояние, причиной которого является сам элемент. Эти отказы происходят при входных воздействиях, находящихся в номинальном диапазоне. Причина этих отказов – естественное старение.

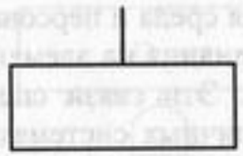
Для вторичного отказа сам элемент не является причиной отказа. Их причина – предыдущие или текущие избыточные нагрузки на элементы. Эти нагрузки могут быть вызваны соседними элементами, окружающей средой или персоналом. Примером такого рода отказов может быть «выход из строя устройства из-за повышенного напряжения в сети». Как правило, вторичные отказы не обеспечены данными по частоте (вероятности) отказов. Если же вид первичного или вторичного отказа определен и данные по нему известны, их рассматривают как исходные, которые в дереве отказов помещают в круг.



Круг — Исходное событие, обеспеченное достаточными данными

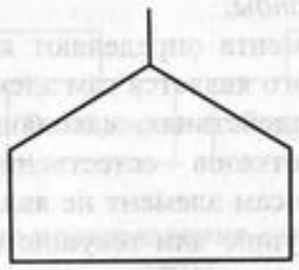


Ромб — Событие, недостаточно детально разработанное

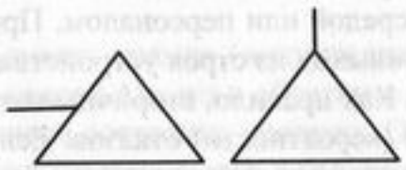


Прямоугольник — Событие, вводимое логическим элементом

Овал — Условное событие, используемое с логическим знаком «Запрет»

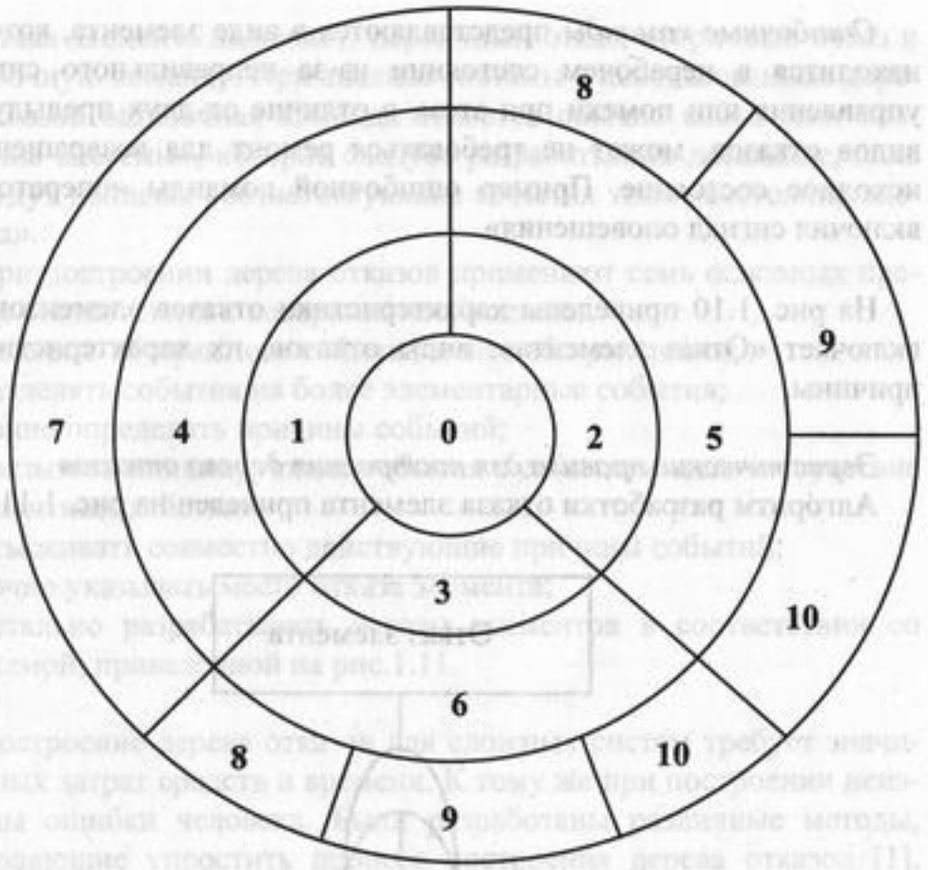


Домик — Событие, которое может случаться или не случаться



Треугольники — Символы перехода

Рис. 1.9. Символы событий



0– отказ элемента;
1– первичный отказ;
2– вторичные отказы;
3– ошибочные команды;
4– элементы в заданных режимах работы;
5– избыточные напряжения;
6– ошибочные команды;
7– естественное старение;
8– соседние элементы;
9– окружающая среда;
10– персонал предприятия

Рис. 1.10. Характеристики отказов элементов

Ошибочные команды представляются в виде элемента, который находится в нерабочем состоянии из-за неправильного сигнала управления или помехи при этом, в отличие от двух предыдущих видов отказов, может не требоваться ремонт для возвращения в исходное состояние. Пример ошибочной команды «оператор не включил сигнал оповещения».

На рис. 1.10 приведены характеристики отказов элементов. Он включает «Отказ элемента», виды отказов, их характеристику и причины.

Эвристические правила для построения дерева отказов

Алгоритм разработки отказа элемента приведен на рис. 1.11.

Рис. 1.11. Разработка отказа элемента

Отказ элемента включает: первичный отказ, вторичный отказ и ошибочную команду. При анализе системы с использованием дерева отказов ошибочная команда является обычно событиями «состояние системы», которое следует разрабатывать детальнее, пока не будут найдены соответствующие события типа «состояние элемента».

При построении дерева отказов применяют семь основных правил, в соответствии с которыми необходимо:

заменять абстрактные события менее абстрактными;

разделять события на более элементарные события;

точно определять причины событий;

связывать инициирующие события с событием типа «отсутствие защитных действий»;

отыскивать совместно действующие причины событий;

точно указывать место отказа элемента;

детально разрабатывать отказы элементов в соответствии со схемой, приведенной на рис.1.11.

Построение дерева отказов для сложных систем требует значительных затрат средств и времени. К тому же при построении неизбежны ошибки человека. Были разработаны различные методы, позволяющие упростить процесс построения дерева отказов [1], например, метод построения дерева отказов при помощи таблиц решений. При этом может использоваться компьютерная программа, что позволяет сравнительно быстро построить дерево отказов.

Построение дерева отказов

Рассмотрим пример построения дерева отказов для конечного события «отказ запуска электродвигателя» в системе рис. 1.12, где *1* – генератор, *2* – выключатель, *3* – электродвигатель, *4* – кабель, *5* – предохранитель.

Дерево отказов является графическим представлением причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в системе в обратном порядке для отыскания возможных причин их возникновения. Таким образом, опасная ситуация в системе является конечным событием дерева отказов. В на-

шем случае полным конечным событием является «отказ запуска электродвигателя при включении выключателя».

Это событие может быть вызвано тремя причинами:

первичный отказ электродвигателя;

вторичный отказ;

ошибочная команда.

Первичный отказ это отказ электродвигателя в результате естественного старения. Вторичные отказы происходят из-за причин, лежащими за пределами, заданными техническими условиями, например, такими как:

перегрев обмотки;

недопустимые вибрации;

неправильное обслуживание.

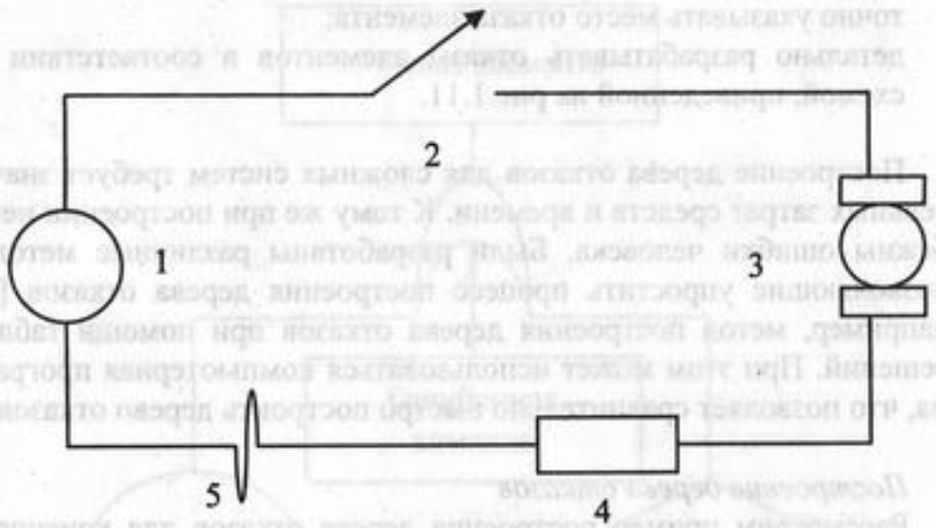


Рис. 1.12. Электрическая схема системы

Ошибочные команды вызываются самопроизвольными управляющими сигналами или помехами. В нашем случае это «отсутствие напряжения на электродвигателе».

Дерево отказов для данной системы приведено на рис. 1.13.

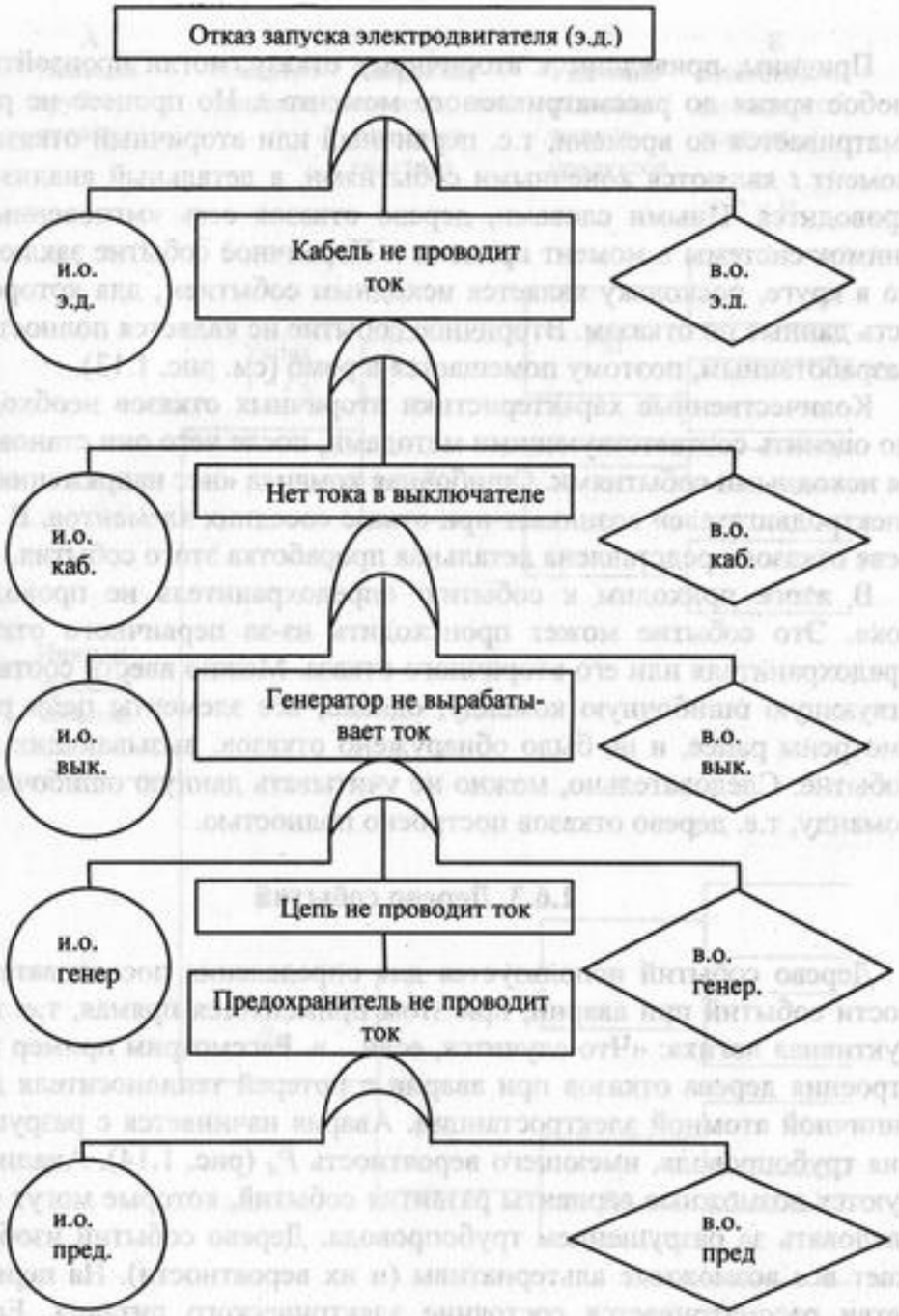


Рис. 1.13. Упрощенное дерево отказов для системы рис. 1.12

Причины, приведшие к вторичному отказу, могли произойти в любое время до рассматриваемого момента *t*. Но процесс не рассматривается во времени, т.е. первичный или вторичный отказы в момент *t* являются конечными событиями, а детальный анализ не проводится. Иными словами, дерево отказов есть «мгновенный» снимок системы в момент времени *t*. Первичное событие заключено в круге, поскольку является исходным событием, для которого есть данные по отказам. Вторичное событие не является полностью разработанным, поэтому помещается в ромб (см. рис. 1.13).

Количественные характеристики вторичных отказов необходимо оценить соответствующими методами, после чего они становятся исходными событиями. Ошибочная команда «нет напряжения на электродвигателе» возникает при отказе соседних элементов. В дереве отказов представлена детальная проработка этого события.

В итоге приходим к событию «предохранитель не проводит ток». Это событие может происходить из-за первичного отказа предохранителя или его вторичного отказа. Можно ввести соответствующую ошибочную команду, однако, все элементы цепи рассмотрены ранее, и не было обнаружено отказов, вызывающих это событие. Следовательно, можно не учитывать данную ошибочную команду, т.е. дерево отказов построено полностью.

1.6.3. Дерево событий

Дерево событий используется для определения последовательности событий при аварии, при этом применяется прямая, т.е. индуктивная логика: «Что случится, если…». Рассмотрим пример построения дерева отказов при аварии с потерей теплоносителя для типичной атомной электростанции. Авария начинается с разрушения трубопровода, имеющего вероятность P_A (рис. 1.14). Анализируются возможные варианты развития событий, которые могут последовать за разрушением трубопровода. Дерево событий изображает все возможные альтернативы (и их вероятности). На первой ветви рассматривается состояние электрического питания. Если питание есть, подвергается анализу аварийная система охлаждения активной зоны реактора.

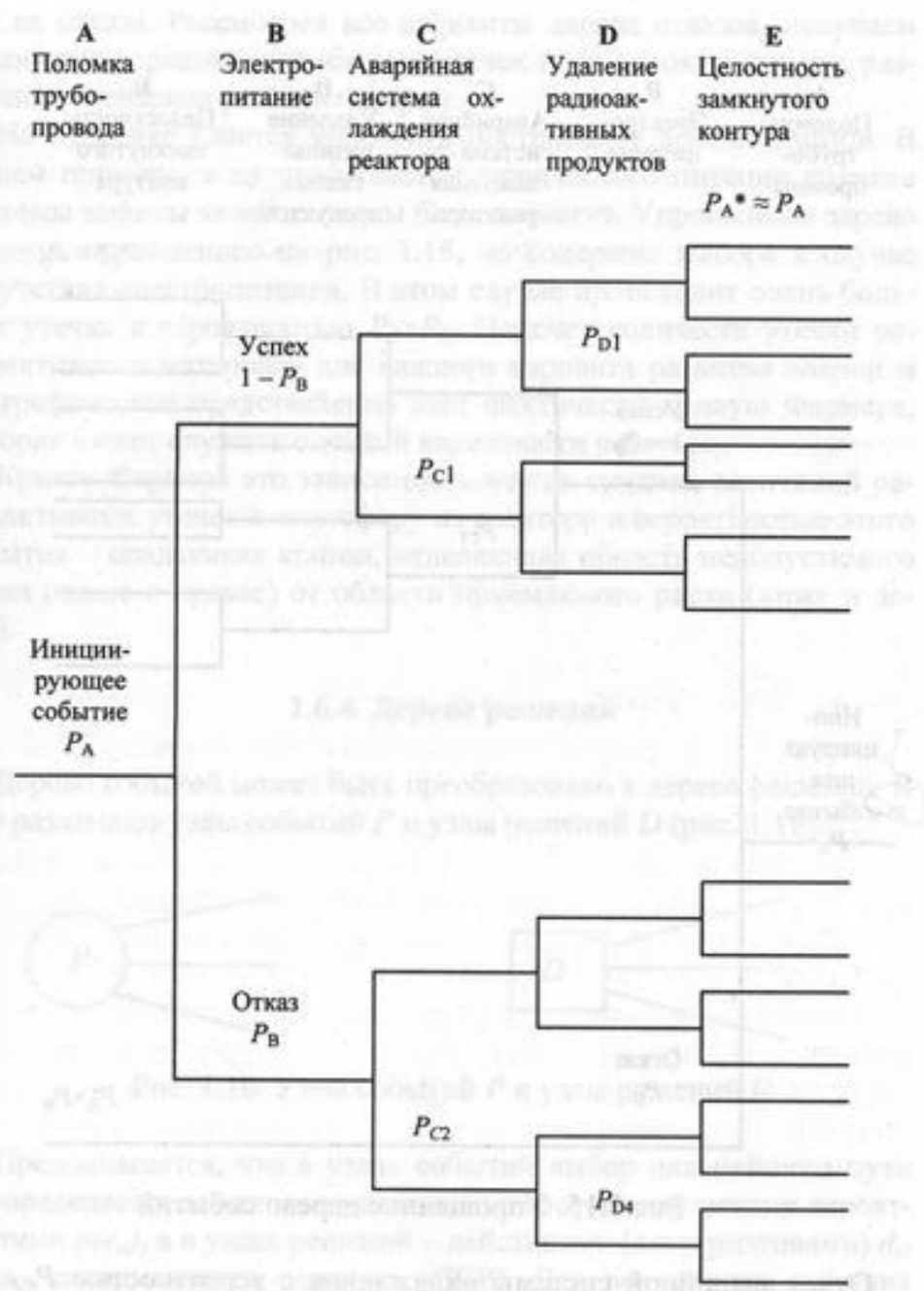


Рис. 1.14. Пример дерева событий.

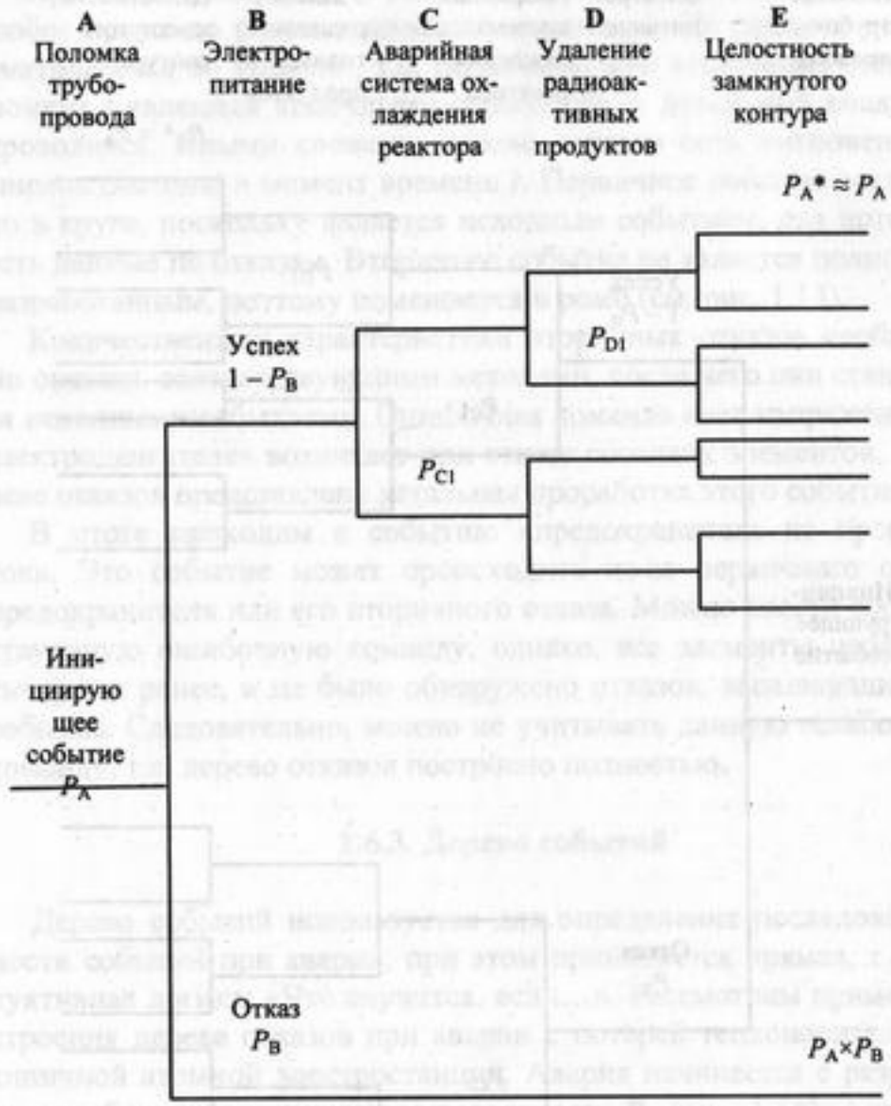


Рис.1.15. Упрощенное дерево событий

Отказ аварийной системы охлаждения с вероятностью P_{C1} может привести к расплавлению топлива и утечке радиоактивных продуктов. Работоспособность системы удаления радиоактивных отходов, в свою очередь, приводит к меньшим утечкам, чем в случае ее отказа. Рассмотрев все варианты дерева отказов, получаем различные варианты возможных утечек и их вероятности для различных сценариев развития аварии.

На практике удается упростить построенное дерево отказов. В нашем примере, в случае отказа электрического питания никакие системы защиты задействованы быть не могут. Упрощенное дерево отказов, приведенное на рис. 1.15, не содержит выбора в случае отсутствия электропитания. В этом случае происходит очень большая утечка с вероятностью $P_A \times P_B$. Подсчет количеств утечки радиоактивного материала для каждого варианта развития аварии и их графическое представление дает фактически кривую Фармера, которая может служить оценкой надежности реактора.

Кривая Фармера это зависимость между средней величиной радиоактивных утечек в атмосферу из реактора и вероятностью этого события – спадающая кривая, отделяющая область недопустимого риска (выше и правее) от области приемлемого риска (ниже и левее).

1.6.4. Дерево решений

Дерево событий может быть преобразовано в дерево решений. В нем различают узлы событий P и узлы решений D (рис. 1.16).

Рис. 1.16. Узлы событий P и узлы решений D

Предполагается, что в узлах событий выбор дальнейшего пути s_{sl} определяется внешними условиями с соответствующими вероятностями $p(s_{sl})$, а в узлах решений – действиями (альтернативами) d_{rk} лица, принимающего решения (ЛПР). Все возможные действия можно связать с узлами решений. Пример дерева решений приведен на рис. 1.17.

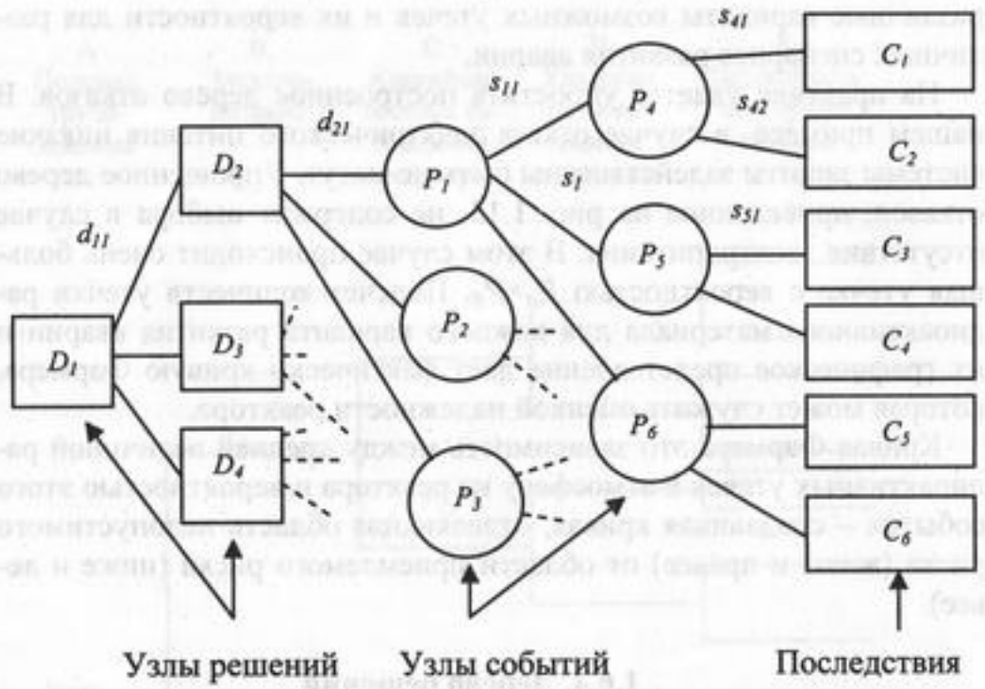


Рис. 1.17. Схематическое изображение дерева решений

В узле D возможны три варианта решений и, соответственно, три варианта действий d_{rk}: D_1- D_2, D_1- D_3 и D_1- D_4. В узлах событий $P_1 - P_6$ возможны различные случайные последующие реализации s_{sj}. Общее число действий и событий здесь представлено схематично.

Деревья решений иерархически представляют собой логические структуры принятия решений, что облегчает процесс уяснения задачи и выработки правильных решений. Деревья решений легко поддаются модификации – их можно дополнительно развить или уменьшить путем исключения ветвей, не имеющих значения.

В отличие от известной матрицы решений деревья решений позволяют наблюдать временной ход процесса принятия решений. С другой стороны, деревья решений в общем случае нельзя представить простой матрицей решений. Таким образом, могут быть представлены только отдельные этапы процесса. Разбиение на этапы проводят так, чтобы выбор решения начинался с некоторого узла

решений, от которого исходят одна или несколько ветвей, представляющих варианты решений. Затем следуют узлы событий, а в конце – конечные состояния с соответствующими значениями выходных параметров. Если за узлами событий опять следует узел решений с соответствующими действиями, тогда это и последующие разветвления относят к более поздней стадии выбора решения. Следовательно, можно проследить весь путь от начала до конца дерева решения.

Можно перевести дерево решений в последовательность матриц, соответствующих отдельным этапам процесса [2]. Применяя определенную последовательность шагов на каждом этапе, можно разбить многоэтапное дерево решений на ряд одноэтапных, каждому из которых соответствует одна матрица решений.

Рассмотрим характерный пример дерева решений с одним узлом решений и тремя узлами событий (рис. 1.18) [2].

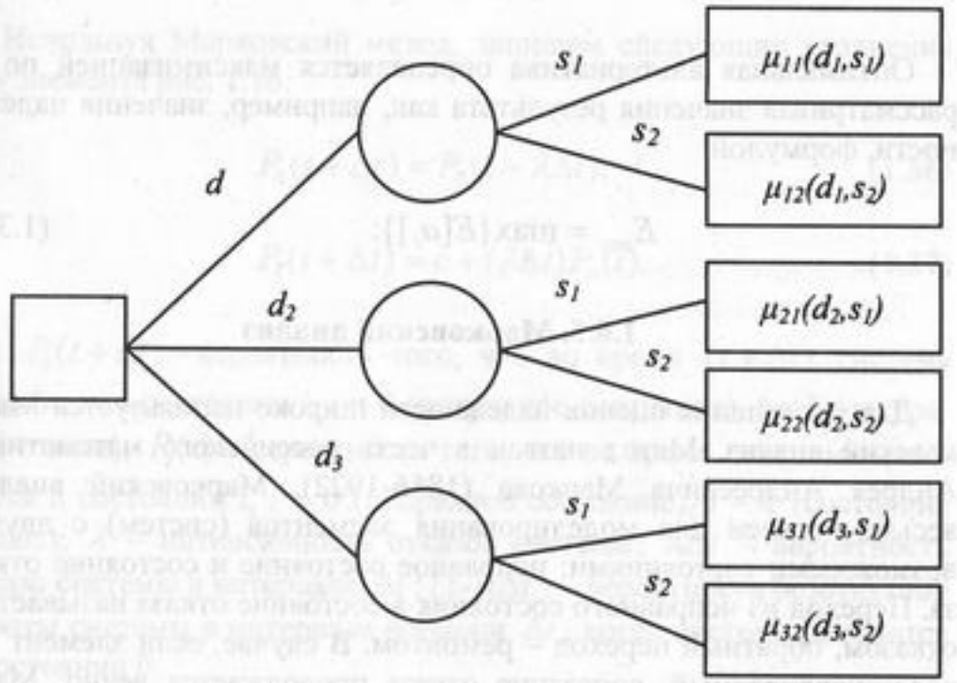


Рис. 1.18. Пример дерева решений

Три ветви, исходящие из узла решений, представляют собой альтернативные варианты действий d_1, d_2 и d_3 (например, соответственно, незначительные, средние и большие расходы на безопасность). Пары ветвей, исходящих из узлов событий, представляют собой различные случайные исходы s_1 или s_2 с вероятностями $p(s_1)$ и $p(s_2)$ соответственно.

Для i-го решения, обозначенного d_i, результат комбинации со сценарием s_j есть пара $(d_i s_j)$. Размер последствий, ассоциированных с парой $(d_i s_j)$, i=1, 2, …, n; j=1, 2, …, m обозначен как μ_{ij}.

Ожидаемое значение результата.

Для определения оптимального решения вычислим ожидаемое значение результата $E[a_i]$ для каждой из n альтернатив (n=3, m=2):

$$E[a_i] = \sum_{j=1}^{m} p(s_j)\mu_{ij}. \qquad (1.34)$$

Оптимальная альтернатива определяется максимизацией по i, рассматривая значения результата как, например, значения надежности, формулой

$$E_{\text{опт}} = \max_i \{E[a_i]\}. \qquad (1.35)$$

1.6.5. Марковский анализ

Для проведения оценок надежности широко используется Марковский анализ. Метод назван в честь российского математика, Андрея Андреевича Маркова (1856-1922). Марковский анализ весьма полезен для моделирования элементов (систем) с двумя возможными состояниями: исправное состояние и состояние отказа. Переход из исправного состояния в состояние отказа называется отказом, обратный переход – ремонтом. В случае, если элемент не восстанавливаемый, состояние отказа продолжается вечно. Марковский анализ базируется на следующих предположениях:

- частота отказов и ремонтов предполагаются постоянными,

- вероятность перехода из одного состояния в другое за фиксированный временной интервал Δt определяется как $\alpha\Delta t$, где α – интенсивность переходов (интенсивность отказов λ и интенсивность ремонтов μ),
- вероятность более чем одного перехода (двух и более) в течение малого интервала времени Δt пренебрежимо мала (т.е. $(\alpha\Delta t)\times(\alpha\Delta t)\to 0$),
- события независимы одно от другого.

Применение Марковского анализа рассмотрим на примере.

Пример 1.4.

Инженерная система может находиться в одном из двух состояний: исправном или отказа. Состояния системы представлены на рис. 1.19. Интенсивность отказов λ, интенсивность ремонтов μ. Получим уравнения для показателей надежности и ненадежности системы и среднего времени до отказа (средняя наработка до отказа).

Используя Марковский метод, запишем следующие уравнения для элемента рис. 1.16:

$$P_0(t+\Delta t) = P_0(1-\lambda\Delta t), \qquad (1.36)$$

$$P_1(t+\Delta t) = c + (\lambda\Delta t)P_0(t), \qquad (1.37)$$

где $P_i(t+\Delta t)$ – вероятность того, что во время $(t+\Delta t)$ система находится в состоянии i, i = 0 (исправное состояние), i = 1 (состояние отказа); $P_i(t)$ – вероятность того, что во время t система находится в состоянии i, i = 0 (исправное состояние), i = 1 (состояние отказа); λ – интенсивность отказов системы; $\lambda\Delta t$ – вероятность отказа системы в интервале Δt; $(1-\lambda\Delta t)$ – вероятность безотказной работы системы в интервале времени Δt, когда система находится в состоянии 0.

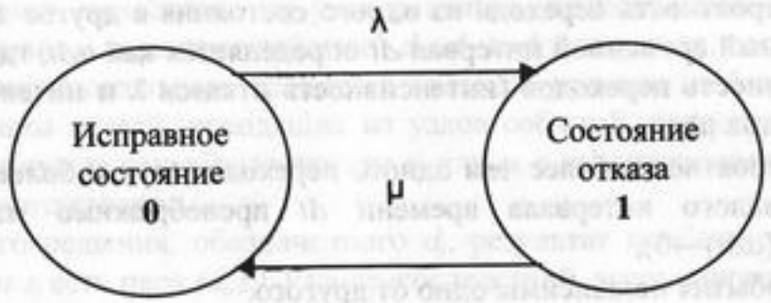


Рис. 1.19. Диаграмма переходов для состояний элементов

Переходя к пределу в уравнениях (1.36) и (1.37) получаем:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_0(t+\Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) \qquad (1.38)$$

и

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_1(t+\Delta t) - P_1(t)}{\Delta t} = \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t). \qquad (1.39)$$

В момент t=0, $P_0(0) = 1$ и $P_1(0) = 0$.

Решая уравнения (1.38) и (1.39) получаем:

$$P_0(t) = R_s(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}, \qquad (1.40)$$

$$P_1(t) = UR_s(t) = (1 - \mathrm{e}^{-\lambda t}), \qquad (1.41)$$

где $R_s(t)$ надежность системы в момент t, а $UR_s(t)$ – ненадежность системы (показатель ненадежности) в момент времени t.

Среднее время до отказа

$$MTTF_s = \int_0^\infty R_s(t)dt = \int_0^\infty \mathrm{e}^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda}. \qquad (1.42)$$

1.6.6. Метод декомпозиции

Этот метод используется, чтобы оценить надежность сложных систем. При этом сложная система разлагается на более простые подсистемы с применением понятия условной вероятности. Надежность системы получается путем комбинирования мер надежностей подсистем.

Первым делом отыскивается ключевой элемент, который используется для декомпозиции данной системы. Неудачный выбор этого элемента приводит к низкой эффективности расчета надежности системы. Как правило, прошлый опыт обычно играет ведущую роль в правильном отборе ключевого элемента.

Первый шаг состоит в том, что ключевой элемент, скажем x, заменяется другим элементом, который никогда не отказывает, т.е. надежность которого составляет 100 %. Второй шаг состоит в том, что ключевой элемент заменяется другим элементом, с ненадежность 100 % (т.е. он полностью удаляется из системы). При таком сценарии надежность системы определяется как

$$R_s = P(x)P(\textit{система работает} / \textit{элемент работает}) + \\ + P(x)P(\textit{система работает} / \textit{элемент отказал}), \qquad (1.43)$$

где R_s – надежность системы;

$P(x)$ – надежность ключевого элемента x;

$P(x)$ – ненадежность ключевого элемента x;

$P(\textit{система работает} / \textit{элемент работает})$ – надежность системы, когда x абсолютно надежен;

$P(\textit{система работает} / \textit{элемент отказал})$ – надежность системы, когда x абсолютно ненадежен.

Аналогично ненадежность системы определяется как

$$UR_s = P(x)P(\textit{система отказала} / \textit{элемент работает}) + \\ + P(x)P(\textit{система отказала} / \textit{элемент отказал}), \quad (1.44)$$

где $P(\textit{система отказала} / \textit{элемент работает})$ – ненадежность системы при абсолютно надежном x,

$P(\textit{система отказала} / \textit{элемент отказал})$ – ненадежность системы при абсолютно ненадежном x.

Применение метода рассмотрим на следующем примере.

Пример 1.5.

На рисунке 1.4 приведена схема моста с пятью элементами, имеющими надежность R_i, i = 1, 2,..., 5. Определим надежность системы с использованием метода декомпозиции.

Прежде всего, выберем элемент с надежностью R_3 в качестве ключевого элемента. Рассматривая его как абсолютно надежный, получаем подсистему рис. 1.20, *a*. Убирая этот элемент в предположении его 100 % ненадежности из системы, получаем подсистему, представленную на рис. 1.20, *b*.

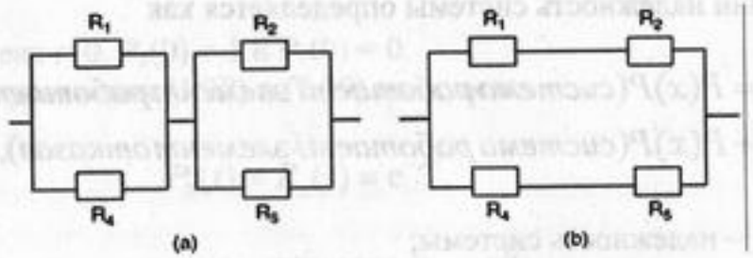


Рис. 1.20. Применение метода декомпозиции.

Для подсистемы рис. 1.20, *a* получаем значение ее надежности как

$$R_a = [1 - (1 - R_1)(1 - R_4)][1 - (1 - R_2)(1 - R_5)]. \quad (1.45)$$

Если элементы идентичны, т.е. $R_1=R_2=R_4=R_5=R$

$$R_a = [1 - (1 - R)^2]^2. \quad (1.46)$$

Аналогично для подсистемы, представленной на рис. 1.20, *b*

$$R_b = 1 - (1 - R_1R_2)(1 - R_4R_5). \quad (1.47)$$

Для идентичных элементов последнее уравнение переходит в

$$R_b = 1 - (1 - R)^2 = 2R^2 - R^4. \quad (1.48)$$

Надежность и ненадежность ключевого элемента *3* задаются, соответственно, как

$$P(x) = R_3 \quad (1.49)$$

и

$$P(x) = (1 - R_3). \quad (1.50)$$

Если $R_3=R$

$$P(x) = R, \quad (1.51)$$

и

$$P(x) = (1 - R). \quad (1.52)$$

Подставляя полученные выражения (1.45), (1.47), (1.51) и (1.52) в (1.43), получаем:

$$R_s=R_3[1-(1-R_1)(1-R_4)][1-(1-R_2)(1-R_5)]+$$

$$+(1-R_3)[1-(1-R_1R_2)(1-R_4R_5)]. \quad (1.53)$$

Для идентичных элементов (1.53) трансформируется в выражение

$$R_s=R(2R-R^2)^2+(1-R)(2R^2-R^4)=2R^2+2R^3-5R^4+2R^5. \quad (1.54)$$

Таким образом, уравнения (1.53) и (1.54) представляют надежность рассмотренной цепи с различными по надежности и идентичными по надежности элементами, соответственно.

1.7. МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ РИСКА

Методика изучения риска включает несколько стадий.

Стадия I: Предварительный анализ опасностей (ПАО).
Определение системы.

Риск на производстве связан с бесконтрольным высвобождением энергии или утечками радиоактивных веществ (РВ), или токсических веществ. В этой связи определенные участки предприятия представляют большую опасность, чем другие. Поэтому в начале анализа следует разбить предприятие на подсистемы, для этого необходимо выявить участки и (или) компоненты, которые являются возможными источниками бесконтрольных утечек. Таким образом, первыми шагами являются:

Шаг 1. Выявление источника опасности (взрывы, пожары, утечки и т.п.).

Шаг 2. Определение частей подсистемы, которые могут вызвать эти опасные состояния (реакторы, емкости и хранилища, энергетические установки и пр.).

При поиске подсистем, которые могут вызывать опасные состояния, полезно составить и использовать список ключевых слов и выражений для обнаружения тенденций к изменениям: «больше чем», «меньше чем», «часть из» и др.

Средствами к достижению понимания опасностей в системе является инженерный анализ и детальный анализ работы оборудования и окружающей среды. При этом важно знать правила безопас-

ности, взрывоопасные условия, степень токсичности, условия возгорания и другие детали протекания процессов в системах. Здесь может помочь составление перечня источников энергии и соответствующих опасностей [1].

На этой стадии необходимы и ограничения на анализ. Так, нецелесообразно детально изучать параметры риска, связанного с разрушением, например, емкости с нефтепродуктами в результате столкновения с ней самолета. Но авиационные катастрофы, землетрясения и другие маловероятные виды опасностей необходимо принять во внимание при анализе риска для АЭС в связи с возможным большим масштабом неблагоприятных событий. Поэтому необходим следующий шаг.

Шаг 3. Введение ограничений на анализ.

Например, необходимо решить, будет ли входить в анализ детальное изучение риска в результате диверсий, саботажа, войн, землетрясений и пр.

Целью стадии I анализа риска являются определение системы и выявление в общих чертах потенциальных опасностей.

Обычная схема классификации опасностей включает:

класс I – эффекты;
класс II – граничные эффекты;
класс III – критические ситуации;
класс IV – катастрофические последствия.

Необходимо наметить предупредительные меры (если они могут быть приняты), чтобы исключить аварии класса IV и, возможно, классов III и II. Возможные решения, которые могут быть рассмотрены, приведены в виде дерева решений на рис. 1.21.

Значительную помощь могут оказать стандартные формы, принятые при проведении ПАО в различных отраслях промышленности. Содержание этих форм носит описательный характер с перечислением как отдельных событий, так и корректирующих действий, которые могут быть предприняты в ответ на эти события.

Большое значение при выполнении ПАО имеет учет граничных условий для оборудования и подсистем. Известен классический случай, произошедший на ранней стадии разработки баллистических ракет США из-за проблем сопряжения электронных блоков. В

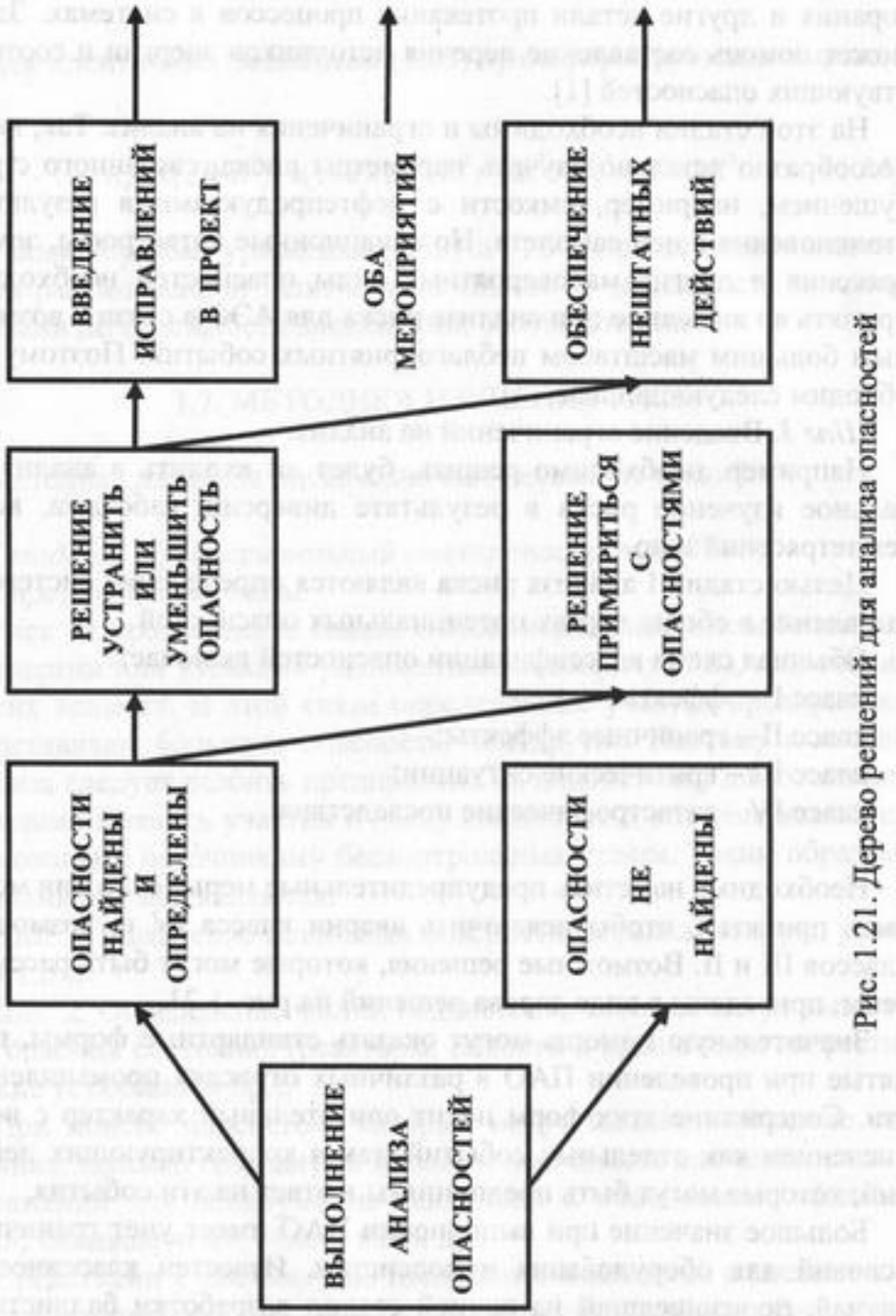


Рис. 1.21. Дерево решений для анализа опасностей

результате аварий были уничтожены сами ракеты и шахтные стартовые комплексы стоимостью несколько миллионов долларов [1].

Следует отметить, что в различных отраслях промышленности методики изучения безопасности могут различаться. В условиях отсутствия директивных документов, предписывающих использование определенных процедур, практика и терминология, используемые в промышленности и относящиеся к стадии I, могут варьироваться в широких пределах. В целом ПАО есть первая попытка выявления оборудования системы и отдельных событий, которые могут привести к возникновению опасностей. Как правило, этот анализ выполняется на начальном этапе разработки системы.

Стадия II: Последовательности опасных ситуаций, дерево событий, дерево отказов.

Стадия II анализа начинается обычно после того, как было выбрано оборудование и определена конфигурация системы. При этом используются, как правило, методы, базирующиеся на использовании дерева событий и дерева отказов, а также другие методы.

В качестве примера рассмотрим вариант изучения безопасности реактора. Рис. 1.22 представляет семь главных задач, решаемых при анализе безопасности реактора. Предположим, на стадии I было установлено, что основной риск обусловлен радиоактивными утечками. Стадия II согласно рис.1.22 начинается с рассмотрения первой задачи – определения последовательности развития аварии. В этой связи на стадии I было выявлено, что критической частью реактора, с которой начинается развитие аварии, является система охлаждения реактора. Следовательно, анализ риска начинается с прослеживания последовательности возможных событий с момента выхода из строя трубопровода охладителя (инициирующего события), вероятность которого равна P_A (см. рис. 1.14).

Величина P_A может быть получена, например, с использованием дерева отказов, объединяющего соответствующим образом экспериментальные данные по отказам элементов и ошибкам человека. В случае отсутствия информации могут быть использованы методы получения данных, которые обсуждаются ниже. Процедура выбора параметров представлена на рис. 1.22 как задача 2.

В соответствии с рис. 1.14 после разрушения трубопровода охладителя анализируются возможные варианты развития событий, которые могут последовать вслед за этим.

В верхней части дерева приведены основные системы и события, следующие за поломкой трубопровода (*A*). Так, рассматривается состояние электропитания (*B*). Если электропитание отсутствует, то никакие другие системы, как правило, не работают. В этом случае дерево событий сводится к упрощенному (см. рис. 1.15). В нем нет выбора в случае отсутствия электропитания – происходит очень большая утечка с вероятностью $P_A \times P_B$. Если же электрическое питание есть, подвергается анализу аварийная система охлаждения реактора (АСОР). Ее отказ с вероятностью P_{CI} приводит к последовательности событий, представленных на рис. 1.14.

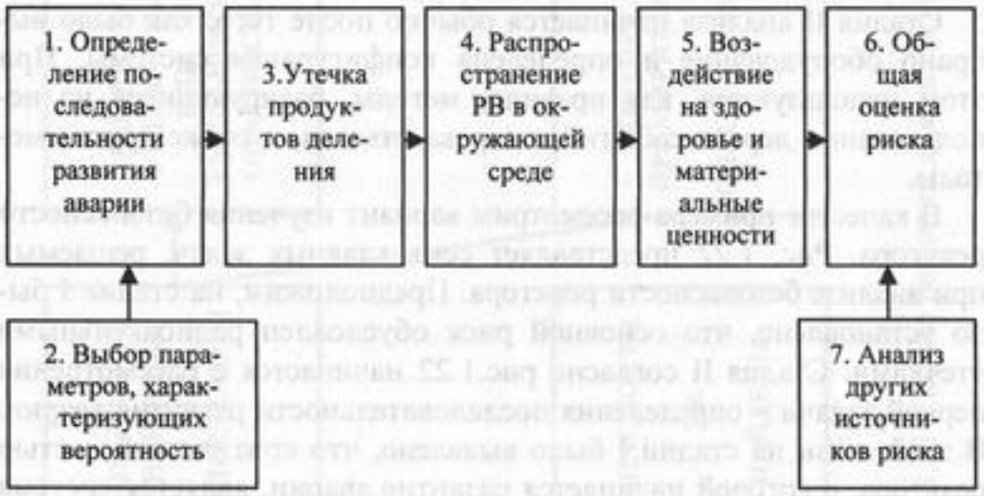


Рис. 1.22. Семь главных задач, решаемых при анализе безопасности реактора

Если АСОР не работает, а система удаления радиоактивных продуктов (*D*) исправна, то утечки меньше. Далее рассматривается целостность замкнутого контура (*E*). Рассмотрев весь спектр событий, можно получить все возможные величины для утечек РВ. Верхняя ветвь дерева является основным вариантом, который подвергается анализу при приемке реактора. Предполагается, что трубопровод разрушается, а все остальные системы сохраняют работоспособность.

При анализе с использованием двоичной системы, в которой элементы или выполняют свои функции или отказывают, число потенциальных отказов равно 2^{N-1}, где N – число анализируемых элементов.

Совместное использование деревьев событий и отказов позволяет выявить последовательности опасных ситуаций и оценить их вероятности.

Стадия III: Анализ последствий

На заключительной стадии изучения риска проводится:

- оценка количества утечки РВ для каждого варианта развития аварии (задача 3 на рис. 1.22);
- расчет распространения РВ в окружающей среде (задача 4 на рис. 1.22);
- оценка последствий аварии на здоровье людей и материальные ценности (задача 5 на рис. 1.22);
- анализ других источников риска (задача 7 на рис. 1.22);
- выработка общего мнения о данном реакторе (задача 6 на рис. 1.22) на основе сравнения с другими видами риска.

На основании решения задачи 3 составляется гистограмма величин вероятностей в зависимости от величин утечек (рис.1.23).

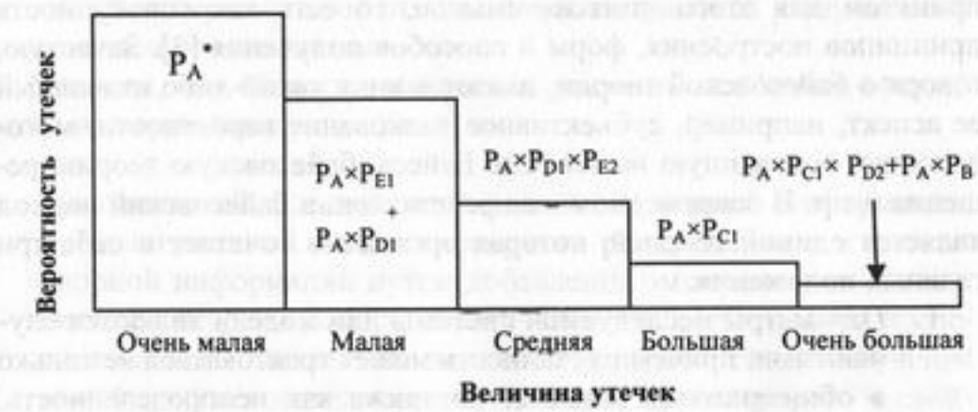


Рис. 1.23. Гистограмма частот для различных величин утечек

Преобразовав эту гистограмму в кривую, получим фактически кривую Фармера, которая может служить мерой оценки безопасности конкретного реактора. Все другие входные величины являются специфическими для анализируемого проекта и зависят от географических особенностей места строительства, включая метеорологические и демографические данные. На базе решения задач 4, 5, 7 может быть сделан вывод о риске данного реактора (задача 6) в сравнении с другими видами риска. Нетрудно показать, что риск, связанный с ядерным реактором очень мал, по крайней мере, на несколько порядков ниже всех рассмотренных рисков [1].

Следует отметить, что существуют и другие методы анализа риска, например, анализ критичности, анализ видов отказов и их последствий и др. В монографии [1] они представлены в порядке возрастания сложности и могут быть использованы в зависимости от специфики задачи и квалификации лиц, осуществляющих анализ.

1.8. БАЙЕСОВСКИЕ СЕТИ

Байесовские сети составляют класс вероятностных моделей для моделирования логики и зависимостей между переменными, представляющими систему.

Методологию байесовского подхода будем понимать в общепринятом для этого понятия смысле, то есть как совокупность принципов построения, форм и способов получения [3]. Зачастую, говоря о байесовской теории, имеют в виду какой-либо отдельный ее аспект, например, субъективное толкование вероятности; методологию, основанную на теореме Байеса, байесовскую теорию решения и т.п. В современном же представлении байесовский подход является единой теорией, которая органично сочетает в себе три главных положения:

1. Параметры исследуемой системы или модели являются случайными, причем случайность может трактоваться не только в общепринятом смысле, но также как неопределенность.

Случайному параметру приписывается априорное распределение.
2. Результаты наблюдения и априорное распределение объединяются при помощи теоремы Байеса с целью получения апостериорного распределения параметра.
3. Статистический вывод или решающее правило принимается исходя из максимизации ожидаемой полезности, в частности, минимизации потерь, связанных с применением этого правила.

Рассмотрим кратко каждое из приведенных положений.

1. Интерпретация суждений в байесовской методологии всегда носит вероятностный характер, при этом случайность трактуется не только в классическом смысле, но и как неопределенность. Вероятностные суждения могут быть представлены в одном из трех видов:
   - с помощью частотной (объективной) интерпретации вероятности, встречающейся крайне редко, так как предполагает существование информации и большое число прошлых опытов;
   - с помощью рациональных степеней уверенности, которые для практических задач преимущественно сводятся к математическому выражению отсутствия априорных знаний;
   - с помощью субъективных уровней доверия, которые выражают персональное отношение исследователя к изучаемому явлению или системе.

Отметим, что области применения указанных способов практически не пересекаются.

2. Методической основой перехода от априорной информации, формализованной в виде априорного распределения, к апостериорной информации путем добавления эмпирических данных является теорема Байеса. Фактически это есть процесс последовательного накопления данных. На первой стадии изучения явления исследователь имеет некоторое представление о свойствах объекта исследования в виде неформализованного опыта

и эмпирических данных, полученных при аналогичных исследованиях. При испытаниях объекта появляется новая информация, которая корректирует представление (вероятностное суждение) о свойствах объекта. Происходит пересмотр и переоценка априорного представления.

Схема процесса пересмотра вероятностей при получении новых данных, предложенная Зельнером, приведена на рис. 1.24.

Рис. 1.24. Схема процесса пересмотра вероятностей

Формула Байеса при помощи преобразования

$$H(\theta|x, I_a) = \frac{h(\theta|I_a)L(\theta|x)}{\int h(\theta|I_a)L(\theta|x)d\theta} \qquad (1.55)$$

позволяет получить апостериорное распределение параметра θ: $H(\theta \mid x, I_a)$, которое является условным по отношению к первоначальной информации I_a и эмпирическим данным x. По мере накопления информации плотность апостериорного распределения все больше концентрируется вокруг истинного значения параметра.

Отметим, что существуют и более изощренные разновидности формулы Байеса, предусматривающие возможность корректировки априорных уровней доверия.

3. В байесовском подходе различие между параметром (случайная величина) и его оценкой (неслучайная величина) находит свое выражение в функции полезности, которая в практических применениях представляет собой функцию потерь. Правило оценивания выбирается из условия минимизации математического ожидания функции потерь. Отметим, что в байесовском подходе не возникает проблема малых выборок.

Байесовская сеть включает в себя:

- набор переменных,
- графические структуры, соединяющие переменные,
- набор условных распределений.

Фактически байесовская сеть представляет собой направленный граф, состоящий из набора узлов и дуг. Узлы представляют собой переменные, а дуги – условные зависимости в модели. Отсутствие дуги между двумя переменные указывают на их условную независимость; то есть вероятность одной из переменных не зависит непосредственно от состояния другой.

Переменные

Переменная может рассматриваться как отображение из пространства возможных результатов в пространство дискретных числовых значений или непрерывных величин. Вероятностные модели могут использоваться, чтобы сопоставит этим числовым значениям соответствующие вероятности или функции плотности вероятности соответственно.

Соотношения в байесовской модели

Модели Байеса предполагают использование здравого смысла и реальной информации для устранения чрезмерной сложности модели системы. Незначимые соотношения не включаются в модель. После установления всех значимых переменных в модели пере-

менные (в узлах модели), которые являются причиной изменений в системе, должны быть соотнесены с теми переменными, на которые они оказывают влияние. Рассматриваются только связи между указанными переменными введением дуг между узлами. Каждая дуга должна представлять причинные отношения между предыдущим – антецедентом (родительская переменная) и последующим результатом (дочерняя переменная). Поскольку модель фокусируется только на существенных зависимостях в системе, ее сложность значительно меньше, чем у модели, учитывающей и совместные распределения вероятностей.

Вывод

Вывод, также называемый *оценкой модели,* представляет собой процесс обновления выхода – вероятности из результатов, основанных на отношениях в модели и получаемой информации. В модели используется информация о недавних событиях или наблюдениях – априорная информация, отражающая исходный уровень доверия. После добавления в модель новой информации обновленные вероятности характеризуют новые уровни доверия в свете полученной новой информации – апостериорную вероятность.

Создание сети

Байесовская сеть может быть создана согласно следующим шагам.

1. Создать набор переменных, представляющих ключевые элементы моделируемой ситуации. Каждая переменная представляется байесовской переменной. Каждая такая переменная описывает набор состояний, представляющих все возможные ситуации для переменной.

2. Для каждой такой переменной определить набор возможных результатов или состояний. Этот набор включает все возможные варианты для переменной, то есть является полным. Причинные отношения между переменными могут быть построены с учетом ответа на вопросы: как другие переменные (если есть такие) могут непосредственно влиять на эту переменную; и как данная переменная может влиять на другие переменные (если есть такие). В стандартной байесовской сети каждая переменная, называемая узлом, представлена эллипсом, квадратом или любой другой фигурой.

3. Установить причинные соотношения между переменными. На этом шаге создаются дуги, идущие от родительской переменной к дочерней переменной. Дуга имеет стрелку, указывающую направление влияния.

4. Оценить априорные вероятности, подставляя в модель числовые значения вероятностей для каждой родительской переменной в соответствии с шагом 3. Использовать условные вероятности, чтобы описать байесовские связи, как показано на рис. 1.25.

Вариант (*а*) показывает, что X_2 и X_3 зависят от X_1. Совместная вероятность переменных X_1, X_2 и X_3 может быть представлена для этого случая с использованием условных вероятностей как

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_3 | X_1)\, P(X_2 | X_1)\, P(X_1). \qquad (1.56)$$

Случай (*б*) показывает зависимость X_3 от X_1 и X_2, которая может быть представлена в виде

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_3 | X_1, X_2)\, P(X_2)\, P(X_1). \qquad (1.57)$$

Для случаев (*в*) и (*г*) зависимости строятся аналогичным образом. Для случая (*в*)

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_3 | X_1)\, P(X_1, X_2). \qquad (1.58)$$

С учетом изменения направления вектора дуги между переменными X_1 и X_2 совместная вероятность для переменных X_1, X_2 и X_3 для случая (*в*) по сравнению со случаем (*а*) видоизменяется соответствующим образом и может быть представлена как

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_3 | X_1)\, P(X_1 | X_2)\, P(X_2). \qquad (1.59)$$

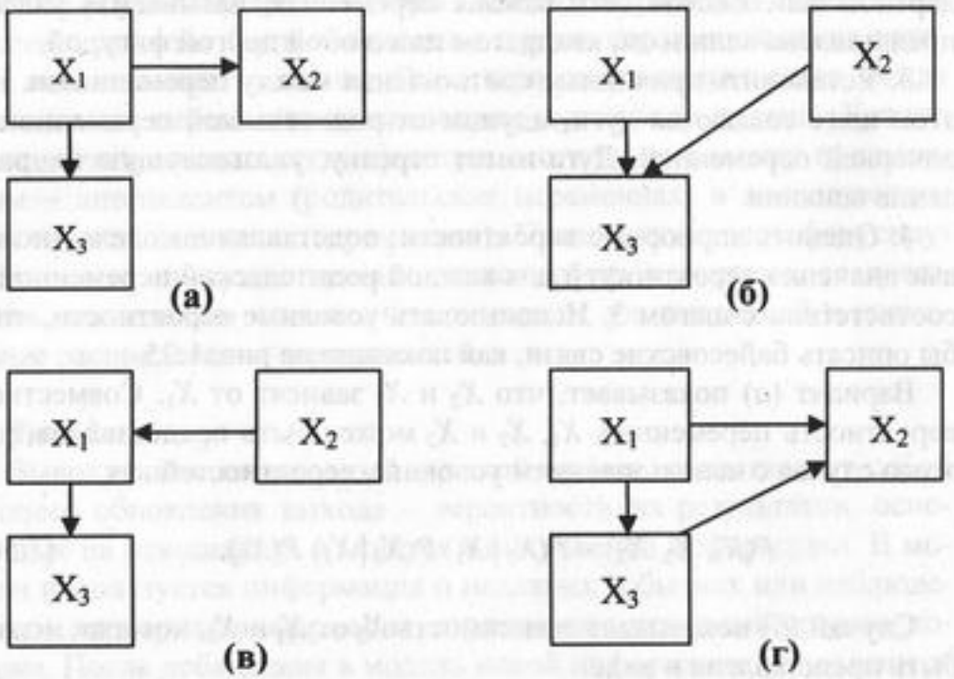


Рис. 1.25. Байесовская сеть

Для случая (*г*) совместная вероятность для переменных X_1, X_2 и X_3 может быть записана в виде

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_3, X_2 | X_1)\, P(X_1), \qquad (1.60)$$

или

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_2 | X_3, X_1)\, P(X_3 | X_1)\, P(X_1). \qquad (1.61)$$

5. Байесовские методы могут использоваться для уточнения вероятностей на базе новой полученной информации. Агрегируя вновь полученную информацию с использованием байесовских соотношений, каждое утверждение, в конечном счете, устанавливает определенную меру уверенности, согласующуюся с аксиомами теории вероятности. Влияние каждой новой порции информации

рассматривается как возмущение, которое распространяется через сеть посылкой – передачей соседних переменных.

Зависимости между переменными можно представлять и с использованием байесовских таблиц и вероятностных деревьев. Байесовская таблица это табличное представление зависимостей, тогда как дерево вероятностей – графическое представление многоуровневых зависимостей с использованием направленных прямых, подобных приведенным на рис. 1.25.

Рассмотрим пример использования байесовских таблиц. Условную вероятность A при условии B, обозначаемую как $P(A\,|\,B)$, можно представить в виде следующей таблицы

Таблица 1.1

Пример байесовской таблицы

Переменные	Вероятности	
A	$P(A\|B) = 0.95$	$P(A\|\overline{B}) = 0.01$
$\overline{A}$	$P(\overline{A}\|B) = 0.05$	$P(\overline{A}\|\overline{B}) = 0.99$

В этом примере, переменная B влияет на переменную A. Вычисления вероятности B для двух случаев: появления A и появления $\overline{A}$ может быть представлено с использованием табл. следующим образом:

Таблица 1.2

Для случая появления события A

Априорная вероятность для B	Условные вероятности для A и B	Совместные вероятности для A и B	Апостериорная вероятность для B после появления A
$P(B) = 0.0001$	$P(A\|B) = 0.95$	$P(B)P(A\|B) = 0.000095$	$P(B\|A) = P(B)P(A\|B)/$ $/P(A) = 0.009412$
$P(\overline{B}) = 0.9999$	$P(A\|\overline{B}) = 0.01$	$P(\overline{B})P(A\|\overline{B}) = 0.009999$	$P(\overline{B}\|A) = P(\overline{B})P(A\|\overline{B})/$ $/P(A) = 0.990588$
Полная = 1.0		$P(A) = 0.010094$	Полная = $P(B\|A) + P(\overline{B}\|A) = 1.0$

Таблица 1.3

Для случая появления события $\overline{A}$

Априорная вероятность для B	Условные вероятности для A и B	Совместные вероятности для A и B	Апостериорная вероятность для B после появления $\overline{A}$
$P(B) = 0.0001$	$P(\overline{A}\mid B) = 0.05$	$P(B)P(\overline{A}\mid B) = 0.000005$	$P(B\mid\overline{A}) = P(B)P(\overline{A}\mid B)/$ $/ P(\overline{A}) = 0.000005$
$P(\overline{B}) = 0.9999$	$P(\overline{A}\mid\overline{B}) = 0.99$	$P(\overline{B})P(\overline{A}\mid\overline{B}) = 0.989901$	$P(\overline{B}\mid\overline{A}) = P(\overline{B})P(\overline{A}\mid\overline{B})/$ $/ P(\overline{A}) = 0.999995$
Полная = 1.0		$P(\overline{A}) = 0.989906$	Полная = $P(B\mid\overline{A}) + P(\overline{B}\mid\overline{A}) = 1.0$

Отметим, что сумма $P(A) + P(\overline{A}) = 1$ для обеих таблиц.

Как уже отмечалось, вероятностное дерево может быть использовано для отображения зависимостей между случайными переменными. Соответствующее вероятностное дерево для двух приведенных в табл. 1.2 и 1.3 примеров приведено на рис. 1.26.

Представлены события B и $\overline{B}$ с их априорными вероятностями, при этом каждая переменная представляется байесовской переменной. Каждая такая переменная описывает набор состояний, представляющих все возможные ситуации для переменной. Новая информация используется для уточнения априорных вероятностей. Агрегирую вновь полученную информацию с использованием байесовских соотношений, получают уточненные на базе опыта значения априорной информации. Каждая новая порция информации уточняет распределение вероятностей, задавая новые значения апостериорной информации. Условные вероятности, также значения совместных вероятностей приведены на рис. 1.26 левее вертикальной пунктирной линии. Значения апостериорных вероятностей приведены в правой части рисунка – правее этой пунктирной линии.

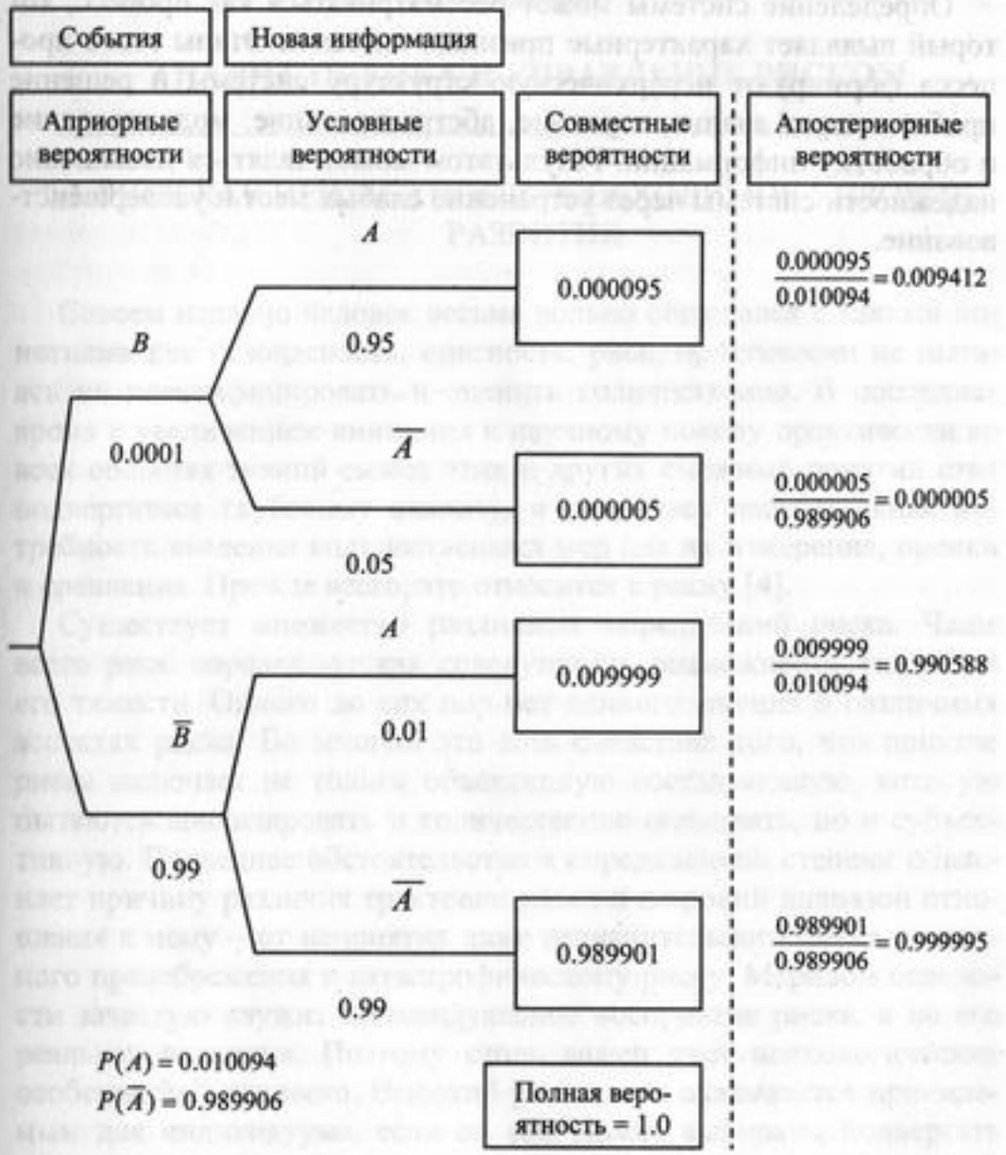


Рис. 1.26. Представление байесовской модели посредством вероятностного дерева

Определение системы может рассматриваться как процесс, который выявляет характерные признаки системы. Этапы этого процесса формируют иерархическую структуру системы и решение проблем через анализ, изучение, абстрагирование, моделирование и обработку информации. Результатом может являться повышение надежности системы через устранение слабых мест и усовершенствование.

Глава 2

АНАЛИЗ, ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ

2.1. РИСК КАК НЕИЗБЕЖНОЕ И НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ РАЗВИТИЯ

Совсем недавно человек весьма вольно обращался с такими понятиями как безопасность, опасность, риск, практически не пытаясь их идентифицировать и оценить количественно. В последнее время с увеличением внимания к научному походу практически во всех областях знаний смысл этих и других смежных понятий стал подвергаться глубокому анализу, и появилась настоятельная потребность введения количественных мер для их измерения, оценки и сравнения. Прежде всего, это относится к риску [4].

Существует множество различных определений риска. Чаще всего риск определяют как совокупность возможности ущерба и его тяжести. Однако до сих пор нет единого мнения о различных аспектах риска. Во многом это есть следствие того, что понятие риска включает не только объективную составляющую, которую пытаются анализировать и количественно оценивать, но и субъективную. Последнее обстоятельство в определенной степени объясняет причину различия трактовок риска и широкий диапазон отношения к нему – от неприятия даже незначительного риска до полного пренебрежения к катастрофическому риску. Мерилом опасности зачастую служит индивидуальное восприятие риска, а не его реальная величина. Поэтому столь важен учет психологических особенностей человека. Высокий риск часто оказывается приемлемым для индивидуума, если он сам может выбирать, подвергать себя риску или нет. Существует фактор привыкания к опасности. В этом смысле новые виды деятельности пугают больше, чем привычные. Отдаленные последствия воспринимаются более приемлемыми, чем близкие, хотя могут быть более значимыми. Большое значение имеет и степень доверия к тому, кто дает информацию о риске. Известно, что у населения большее доверие вызывают орга-

низации с вывесками «экологическая», чем правительственные; оно больше доверяет средствам массовой информации и знакомым, чем специалистам. Поэтому в некоторых случаях возникает ощущение, что понятие риска ближе к таким нечетким категориям, как, например, красота, чем к таким, как герц, джоуль. Поэтому и восприятие его ближе к восприятию вкуса и цвета, чем стоимости.

Сложность, многомерность понятия риска приводит к тому, что для доказательства приемлемости какой-либо технологии необходимо не просто продемонстрировать величину «приемлемости» риска. В этой связи необходимо совершенствовать методики оценки риска, в том числе с использованием современных технологий, позволяющих адекватно учитывать субъективную информацию. Это поможет более убедительно подтверждать опасность или безопасность технологии, процесса, совершенствовать работу по уменьшению (оптимизации) риска. В свою очередь, анализ и оценка риска являются стимулом для совершенствования приборов и установок, поиска путей уменьшения числа аварий.

История человечества – это история развития технологий, уменьшающих зависимость от негативных природных явлений. Пока последствия использования этих технологий были невелики и обозримы, а их реализация легко проверялась на практике до широкого использования, можно было не очень озадачиваться необходимостью предварительных оценок риска внедрения. С изменением масштабов возможных последствий деятельности человека ситуация коренным образом изменилась. В настоящее время необходимо не только проводить предварительные оценки риска использования новой технологии, но и разрабатывать модели оценки риска, учитывающие все стадии от внедрения до выведения из использования с учетом взаимовлияния других технологий, влияния на окружающую среду и человека, включая социальные последствия. Только на этом пути можно получить ответ на вопрос, не приведет ли внедрение новой технологии к росту общего риска и/или катастрофическим последствиям.

Примером технологии, которая выставила человеку непривычные требования к ответственности за свои действия, является ядерная технология. С одной стороны, именно идентификация ее как крайне опасной технологии с самого момента появления привело к

тому, что в рамках этой технологии разработаны эффективные модели оценки риска, являющиеся примером для других энерготехнологий. С другой стороны, ядерная технология привела к появлению нового типа глобального риска. Даже в случае полного отказа от ядерной энергетики, лишившись попутно соответствующих благ, будет невозможно полностью устранить этот риск. В этом смысле ядерная технология это технология нового типа, открывающая новый этап развития человека, характеризующийся наличием неустранимого риска, созданного им самим. В этой ситуации все большее значение приобретает выработка рационального отношения к опасности, риску. Бессмысленно стремиться сделать риск нулевым. Нужно уметь адекватно оценить опасность и научиться управлять ею.

2.2. ЭВОЛЮЦИЯ РИСКА

По оценкам ученых прошло примерно 4 млрд. лет с момента возникновения жизни на Земле и около 4 млн. лет с момента появления человека [5]. То есть, человек не выживает в течение длительного времени. Переходя к другой, деноминированной шкале, получаем, что прошло 40 лет со времени появления ранних форм жизни, а человек появился примерно две недели назад. В этой шкале ранние цивилизации оформились только 20 минут назад, а индустриальная революция, которая преобразовала их жизнь и теперь является угрозой выживания человека и окружающей среды, началась примерно в течение последней минуты.

Первобытный человек был частью окружающей природы, и только более поздние цивилизации (не без влияния западных философов и религии) воспитывались на представлении, что мир и его ресурсы созданы для исключительного использования человеком. К счастью, в течение последних десятилетий, под влиянием выводов научных исследований, высокомерное отношение к природе пусть медленно, но начинает меняться.

То, что человек не только выжил, но и стал доминирующим видом, явилось следствием двух важных свойств – возможности общаться и высокоразвитому уму. Через общение человек смог действовать коллективно – это дало возможность успешно защищаться

в полном угроз окружении и эффективно использовать земные ресурсы, в том числе продовольственные.

Предполагается, что интеллектуальные способности человека во многом определяются развитием языка. Путем развития этих способностей, обучению, наблюдению и опыту человек получил возможность увеличивать контроль над окружающей средой и своей судьбой.

Развитие науки и техники привело к существенным изменениям в окружающем нас мире. Человек демонстрирует уникальную способность выживания в различных меняющихся обстоятельствах путем адаптации и использования достижений научно-технической революции. В течение двух последних поколений численность людей удвоилась. В развитых странах, где преждевременная смертность сведена к низкому уровню, больше заботятся о качестве жизни, чем о преждевременной смерти. К сожалению, значительные материальные и социальные преимущества, являющиеся следствием научно-технической революции, достигаются ценой возникновения новых техногенных угроз как качеству, так и самой жизни. Эрозия почв и уничтожение лесов, загрязнение водных бассейнов, нарушение теплового баланса в атмосфере и разрушение озонового слоя – вот далеко не полный перечень негативных воздействий человека на окружающую среду.

Парадоксально, но этим процессом управляет инстинкт выживания. У индивидуумов – это увеличение количества особей. Производства и организации борются за выживание путем роста чистой прибыли. Наиболее эффективный путь ее увеличения – вкладывание денег в новые технологии. При этом в процесс неизбежно вовлекается *риск*, причем не только для инвесторов, но и для работающих, покупателей новой продукции и общества в целом.

Таким образом, риск – неотъемлемая черта любой человеческой деятельности. В каждом решении заложена не альтернатива: "рисковать или не рисковать", а "какой риск выбрать". Человек, организации и правительства сталкиваются с одними и теми же проблемами управления риском. Сложность управления риском во многом обусловлена тем, что данная предметная область является междисциплинарной. Математики, физики, биологи, экологи, медики, физиологи, экономисты, управленцы, политологи и другие

специалисты должны вносить свой вклад в решение данной проблемы. Как следствие, риск предполагает наличие различных концепций и мер, и до настоящего времени не существует унифицированного подхода к проблеме управления риском. С неизбежностью присутствуют проблемы с фундаментальными концепциями, основными определениями и терминологией. Существует большое число публикаций, в которых обсуждается происхождение термина *риск*. Рассмотрим коротко его историю.

Происхождение термина риск.

Считается, что слово риск происходит от арабского слова *risk*, или латинского *risiqum*. Первое означает «нечто, что дано вам (богом), и посредством чего вы получаете выгоду» и имеет дополнительное значение как случайный и благоприятный исход. Второе первоначально относилось к вызову, который риф бросал моряку, и имело дополнительное значение, как случайный, но неблагоприятный исход.

Греческое производное арабского *risk*, которое использовалось в XII веке, относилось к случайным исходам вообще и не подразумевало ни положительного, ни отрицательного значения.

Современное французское *risqué* имеет главным образом негативное, иногда позитивное дополнительное значение (nothing ventured nothing gained), в то время как английское риск имеет четкую интерпретацию как в «run the risk of» или «at risk», означающее «подвергаться опасности».

Oxford Dictionary (1976) определяет риск как «вероятность опасности, плохих последствий, потерь и т.д.». Webster словарь (1981) также подчеркивает негативные последствия «возможности потерь, повреждения, ущерба или разрушения». Словарь Ожегова: 1 – возможная опасность, 2 – действие наудачу в надежде на счастливый исход.

С течением времени значение слова изменилось от описывающего некоторый неожиданный исход (плохой или хороший) решения или действия к значению, относящемуся к нежелательным исходам и вероятности их появления.

В специальной литературе слово риск подразумевает измерение случайности (возможности) исхода (результата), его величину или

комбинацию обоих. Предпринимались многочисленные попытки объединить и то и другое в одном определении, например, «риск – потенциал для нежелательных негативных последствий события или действия», «мера вероятности и серьезности неблагоприятных эффектов» или «риск – некий непреднамеренный или неожиданный результат (исход) решения или действия», «возможность человеческих жертв и материальных потерь или травм и повреждений» и т.п.

Специалист по надежности формулирует риск иначе: «вероятность человеческих и материальных потерь или повреждений».

Математическое выражение для риска

Математически риск может быть представлен как некая комбинация (объединение, интеграция, слияние, сплав) вероятности (возможности) неблагоприятного события и его последствий. В общем случае это многомерная величина (функционал) [6]:

$$R = [(p_1,c_1), (p_2,c_2), \ldots, (p_n,c_n)], \qquad (2.1)$$

где p_i – вероятность инцидента, c_i – его последствия, количество последствий.

Общее выражение для риска может быть представлено как

$$R = [(p_1,o_1,u_1,cs_1,po_1), \ldots, (p_n,o_n,u_n,cs_n,po_n)], \qquad (2.2)$$

где p_i – вероятность, o_i – последствие (исход, происшествие), u_i – значимость, ps_i – сценарий инцидента, po_i – популяция, подверженная последствиям.

Вероятность происшествия $p(o)$ может быть представлена как композиция вероятности неблагоприятного события $p(t)$ и условной вероятности исхода при условии появления неблагоприятного события:

$$p(o) = p(t)p(o/t), \qquad (2.3)$$

где вероятность $p(o/t)$ характеризует уязвимость системы при условии появления неблагоприятного события.

В технических терминах риск любого человека погибнуть в течение года, например, в автомобильных катастрофах составляет [1]: $R = n / N$, где n – число смертельных случаев в автомобильных катастрофах в данном регионе, а N – число жителей данного региона. Если n=5×10^4, а N=2×10^8, то R = 2.5×10^{-4} (смертельных исходов в год на человека). Поскольку риск может иметь не обязательно смертельный исход, более общим выражением является:

риск [последствие / время] = **частота** [событие / время] ×
× **величина** [последствие / событие].

Например,

5×10^4 [смертельных случаев / год] = 5×10^7 [аварий / год] × 10^{-3} [смертей / аварий].

Необходимо сделать несколько замечаний относительно приведенных выражений для риска. Во-первых, отметим, что вероятностная величина 2.5×10^{-4} смертельных исходов в год на человека означает, что если бы жители данного региона имели равную вероятность погибнуть в автомобильных катастрофах, то, при отсутствии других причин смерти, все население региона погибло бы в течение 4 тысяч лет.

Заметим, что только наличие данных большого объема придает смысл сделанным выводам. Любой житель региона может сказать, что приведенные данные не имеют для него особого смысла, поскольку погибнуть в катастрофе он может, например, послезавтра. И в значительной степени он будет прав.

Из приведенного выражения для риска видно, что как само значение **риска**, так и **частота** (в общем случае и **величина**) есть произвольные значения, не обязательно меньше единицы.

Подход к анализу риска, как правило, встречающийся в литературе, основан на классическом принципе определения относительных частот событий при длительных испытаниях. В этом случае **частота** приобретает трактовку вероятности. Однако в ряде случаев, например, если анализ риска проектируемого реактора дает величину10^{-7} жертв в год, мы имеем дело не с относительными частотами при длительных испытаниях, а с так называемыми «редкими

событиями», к которым классический вероятностный подход, основанный на статистических выводах, не может быть применен.

Восприятие риска

Воспринимаемый риск и фактический риск не обязательно совпадают в реальной жизни.

Индивидуумы, организации и правительства, принимая решения, базируются на их вероятностных последствиях. При этом некоторые неизбежные последствия могут быть не идентифицированы, возможны значительные просчеты с самими предсказываемыми событиями и их оцененными вероятностями, некоторые из них могут быть скорее воображаемыми, чем реальными. Иными словами, может быть значительное несовпадение набора реальных и воспринимаемых потенциальных исходов. Например, значительная часть населения воспринимает атомную энергетику как крайне опасную, в то время как специалисты в области риска придерживается противоположного мнения.

Ошибочное восприятие последствий решений само по себе – значительный источник риска в принятии решений. Поэтому необходимо прикладывать все усилия для получения полного и точного восприятия риска перед проведением его анализа и оценки. Реальный или воображаемый воспринимаемый риск должен быть принят во внимание при принятии решений, и существует настоятельная необходимость в соответствующих методах анализа и оценки риска.

Отождествление возможных результатов решений есть цель анализа риска, а оценка вероятностей и величины исходов – предмет оценки риска.

Анализ риска

Анализ есть разложение целого на компоненты, исследование целого, его элементов и их взаимосвязей. Разложение может быть фактическим или мысленным. Рассмотрим пример анализа риска на простом примере.

Парадигма риска может быть представлена в форме дерева решений [5].

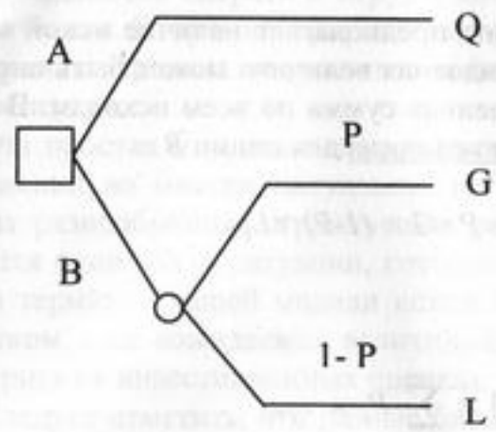


Рис. 2.1. Дерево решений для парадигмы риска

На рис. 2.1 представлены две опции: опция *A* не имеет альтернатив и ведет к определенному исходу. В данном случае она характеризует *статус кво*. Опция *B* имеет два вероятностных исхода - с вероятностью *P* может реализоваться вариант с выигрышем *G* (gain), или с вероятностью (1-*P*) вариант с потерями *L* (loss).

Пример: продолжение выпуска хорошо известной продукции, или выход на рынок с новой. Возможность прибыли (выигрыша) сосуществует с риском потерь. В реальной ситуации может быть больше вариантов выбора или исходов, однако суть от этого не меняется. Более общая модель может включать возможность и последовательность взаимосвязанных решений, различные альтернативы выбора или континуум возможных исходов для некоторых опций. Структура подобной модели может быть весьма непростой, например, когда проводится анализ сложного объекта. Тем не менее в каждой точке решения существо проблемы одно и то же – необходимость сравнения двух или более возможных исходов со своими вероятностями. Процесс оценки вероятности и размера возможных исходов и оценка альтернативных способов действий и есть оценка риска.

Оценка риска

Оценка и сравнение рисков предполагает наличие некой меры риска. В теории решений ожидаемая величина может быть определена как вероятностно взвешенная сумма по всем исходам. В случае нашей модели ожидаемая величина для опции *B*

$$EV[B] = P \times G + (1\text{-}P) \times L; \qquad (2.4)$$

в общем случае

$$EV\ [v] = \sum_{i=1}^{n} P_i \times v_i, \qquad (2.5)$$

где P_i – вероятность *i*-го исхода, v_i – величина i-го исхода, $\sum_{i=1}^{n} P_i = 1$.

Дисперсия, как мера риска:

Использование статистического подхода может быть расширено путем использования статистической меры дисперсии или вариабельности как *меры риска*. В нашем случае вариация возможных исходов из-за выбора *B* может быть определена как

$$V[B] = P \times (G\text{-}EV[B])^2 + (1\text{–}P) \times (L\text{-}EV[B])^2; \qquad (2.6)$$

или

$$V\ [v] = \sum_{i=1}^{n} P_i \times (v_i - EV\ [v])^2. \qquad (2.7)$$

Ожидаемую величину *EV[B]* можно интерпретировать двумя путями. Простейшая интерпретация – это средняя величина исхода, когда решение принимается много раз. Более сложная – это максимальная плата, которую «рациональный» человек готов заплатить

за возможность сыграть в игру, в которой исходы имеют данные вероятности. Вторая интерпретация, однако, может быть объяснена в терминах средних результатов и базируется на тех же резонах, что и первая.

Эта простая мера является, несомненно, полезной основой для сравнений во многих ситуациях. На практике подобный подход имеет разнообразные ограничения: решения, как правило, принимаются один раз (в ситуации, которые не повторяются). Кроме того, в терминах нашей модели исход может быть выигрышем или убытком, а не «ожидаемой величиной». Вариация исходов – синоним риска в инвестиционных оценках.

Следует отметить, что разные биологические виды своим поведением демонстрируют стремление избегать риска. Так пчелы предпочитают посещать цветы с постоянным содержанием нектара, а не с переменным (но с тем же средним содержанием). Более того, с увеличением колебаний содержания нектара в цветах с переменным содержанием приводит к росту числа пчел, избегающих риска. Это происходит до тех пор, пока среднее в цветах с вариациями не превзойдет значение содержания нектара в цветах с постоянным его значением. Тогда пчелы «соблазняются риском» и летят к цветам с большим разбросом значений нектара.

Таким образом, если есть два исхода с одинаковыми выплатами, но разными вариациями – предпочтительной будет та, где вариации меньше. Если же исходы имеют одинаковую вариацию, предпочтительным будет исход с большей средней выплатой.

2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ, ОПАСНОСТЬ, РИСК

В настоящее время нет устоявшейся терминологии, единообразно трактующих понятия безопасности, опасности и риска. Зачастую в одно и то же понятие разные авторы вкладывают разный смысл. Наиболее часто в литературе понятие безопасность определяется как состояние защищенности. При этом понятие защищенности не раскрывается. Некоторые авторы считают, что «опасность и риск – синонимы…, а безопасность имеет противоположное значение» [7]. Иногда безопасность рассматривается как понятие про-

тивоположное понятию опасность [8]. Тем самым тяжесть определения одного понятия переносится на другое.

В статье [9] предпринята попытка выстроить логическую последовательность понятий, ведущих к определению понятия «безопасность» через рассмотрение понятий «система» и «взаимодействие».

При этом мир представляется как совокупность систем, выделенных по определенным признакам частей мира, внутри которых есть определенные связи, позволяющие рассматривать их как целое по отношению к другим системам (см. рис. 2.2). Разбиение на системы зависит от выбора критериев и является, вообще говоря, неоднозначным. Взаимодействия системы с другими и внутренняя динамика развития приводят к изменениям системы (переходам между ее состояниями). По отношению к какой-либо выделенной системе остальные системы образуют «окружающую среду».

Введем понятие «*Оценщик*» (см. рис. 2.2). Предполагается, что он классифицирует происходящие с данной системой (объектом безопасности) изменения, при наличии меры определяя их в зависимости от целевых установок как позитивные (выгода), негативные (убытки) или нейтральные. Сам оценщик может быть как вне, так и внутри системы. Возможна ситуация, когда часть параметров системы изменяется в сторону выгоды, а другая в сторону убытков. Общий эффект при этом определяется как разности выгоды и убытков.

В случае, когда отрицательные последствия превалируют и общий эффект отрицательный – системе причинен ущерб. Определим: *ущерб* – негативный эффект происходящих в данной системе изменений.

Определим: *опасность* – возможность того, что данной системе будет нанесен ущерб.

С учетом качественного различия происходящих изменений и видов воздействия можно рассматривать пожарную, химическую, радиационную и др. виды опасности и, соответственно, составляющие общего ущерба. Причины опасности могут крыться как в самой анализируемой системе, так и в окружающих системах.

Введем понятие «Управленец» (см. рис. 2.2). Предполагается, что он может влиять на ситуацию, в которой есть возможность причинения ущерба. Управленец руководствуется классификацией,

даваемой оценщиком. Управленец может находиться как внутри системы, так и вне ее; он может совмещать функции оценки и управления. Разные стратеги управления по-разному влияют на ущерб системы.

Рис. 2.2

Для оценки эффективности управления можно ввести понятие «риск» как меру опасности при разной стратегии управления, включая риск при отсутствии управления. Определим: *риск* – мера опасности, характеризующая возможность причинения ущерба и его тяжесть. Предполагается, что можно оценить масштаб ущерба – его тяжесть. Это определение включает в себя как частный случай применяемые на практике методы оценки риска как математического ожидания ущерба.

В целом понятия «риск» и «опасность» близки. Чаще всего риск выступает как характеристика действия (рискованные действия), а опасность – как характеристика состояния объекта (опасный фактор).

Классификации риска может быть проведена по месту и времени – как локальный и интегральный; по полноте охвата – как парциальный и суммарный; по типу опасности – химический, радиационный и др.; по добровольности принятия – добровольный и вынужденный; по приемлемости – недопустимый, приемлемый, пренебрежимый.

В настоящее время преобладающим становится понимание того, что риск для любой системы не может быть сведен к нулю. Иными

словами, абсолютной безопасности нет. В этом смысле представляется более логичным трактовать безопасность системы как такое ее состояние, при котором суммарный риск не превышает некоторого порогового значения, определяемого оценщиком в соответствии с выбранной шкалой ценностей. При этом можно было бы определить безопасность как пребывание данной системы в условиях несущественного риска. Этот принцип известен в зарубежной литературе как принцип ALAPA (As Low As Practically Achievable – настолько низко, насколько это практически достижимо). Однако в условиях высокой техногенной опасности и загрязнения окружающей среды подобный подход был бы излишне идеализирован. Поэтому в настоящее время общепризнанным является следующее определение: безопасности – пребывание данной системы в условиях приемлемого риска. Этот принцип известен как принцип ALARA (As Low As Reasonable Achievable – настолько низко, насколько это разумно достижимо).

Необходимо отметить, что и в том и в другом случае шкала безопасности является порядковой шкалой, т.е. значение имеет лишь непревышение уровня риска, ограничевающего сверху область безопасности, иными словами, порог безопасности.

Относительность безопасности

Можно указать, по крайней мере, пять аспектов относительности безопасности. Анализируя вопросы безопасности, необходимо понимать:

1) о безопасности какой системы идет речь;
2) с каких позиций рассматриваются изменения в системе (кто оценщик);
3) как определена область безопасности (приемлемый или пренебрежимый риск);
4) каков порог безопасности;
5) какова динамика процессов, влияющих на изменение оценок риска и установление порога безопасности (вечной безопасности нет).

При определении границ *приемлемого риска* большую роль играют многие обстоятельства места и времени, а также характер общества и его экономические возможности, традиции, предпочте-

ния лиц, принимающих решения и т.п. Общий принцип можно сформулировать следующим образом: *приемлемым* является уровень риска техногенной деятельности, который общество готово принять ради получаемых экономических и социальных выгод. Иными словами, общий эффект этой деятельности должен быть положительным. Конечно, при этом интересы разных групп населения и индивидуумов могут затрагиваться по-разному. Поэтому проблема определения уровней приемлемого риска является частью общей проблемы оптимизации учета распределения ограниченных средств с учетом разных интересов – многокритериальную задачу.

Необходимо отметить, что несмотря на принцип относительности безопасности определение «безопасный» имеет право на существование. При этом, например, для объекта имеются в виду определенные условия эксплуатации, обеспечивающие не превышение порога безопасности.

2.4. ТЕХНОЛОГИИ РИСКА

Технологии риска (ТР) – методы или процессы, используемые для оценки и управления рисками. ТР методы можно классифицировать различным образом; один из вариантов классификации приведен на рис. 2.3. Технологии риска в данном варианте включают управление риском (management), которое подразумевает анализ риска (analysis), оценку риска (assessment) и контроль риска (control), а также риск - коммуникации (risk communication) [6].

Анализ и оценка риска включают идентификацию опасностей, оценку вероятности событий и оценку последствий.

Контроль риска предполагает определения приемлемого риска и сравнительную оценку вариантов и/или альтернатив посредством мониторинга и анализа решений. Контроль риска также включает предотвращение отказов (аварий) и уменьшение их последствий.

Риск коммуникации включает восприятие риска и зависит от аудитории, поэтому и классифицируется как риск - коммуникации со средствами массовой информации (СМИ) и обществом, и риск - коммуникации с инженерным сообществом.

Рис. 2.3. Технологии риска

2.4.1. Классификация риска

Под классификацией понимается подразделение рисков на категории с применением определенных критериев. Выбор критериев зависит от задач, целей и особенностей процедур технологий риска. В зависимости от степени общности критериев и (или) характеристик риска можно выделить [10]:

- общую классификацию риска,
- частные виды классификации.

Общая классификация

Критериями этой классификации выступают общие для всех видов риска характеристики.

В рамках общей классификации критериями могут являться:

1. источники, факторы или причины опасности (ущерба);
2. объекты опасности;
3. уровни/масштабы опасности (последствий);
4. временная зависимость;
5. регулярность или типичность;
6. характеристика последствий реализации риска;
7. характеристика взаимодействия с другими рисками;
8. характеристика масштаба риска;
9. возможность свободы выбора;

10. характеристика степени измеримости и прогнозируемости риска.

(1) По источникам, факторам или причинам опасности (ущерба) можно выделить следующие виды рисков:

- антропогенные, связанные с деятельностью человека;
- природные, связанные с природными катастрофами и стихийными бедствиями;
- социогенные (социальные – преступность, неблагоприятные социальные проявления и пр.; экономические; политические);
- техногенные, связанные с функционированием технических систем;
- комбинированные (природно – антропогенные, природно – техногенные и пр.);
- внутренние, связанные, например, с организацией работы конкретной фирмы;
- внешние, определяемые внешними обстоятельствами.

(2) По объектам опасности можно выделить риски:

- социально-политические, где объектом опасности служат общественные отношения – здесь можно выделить следующие риски:
  - индивидуальные;
  - коллективные;
  - общесоциальные;
  - внутриполитические;
  - внешнеполитические;
  - общеполитические;
- Экономические.

(3) По уровням/масштабам опасности (последствий).

По критерию географического охвата можно выделить риски:

- локальные;
- региональные;
- национальные;

- глобальные.

По критерию степени опасности (последствий) риски можно подразделить на:

- незначительные;
- существенные;
- значительные.

Можно провести аналогичное разделение рисков и, например, для социально-экономической системы.

(4) По временной зависимости критериями для классификации могут выступать:

- Степень действия временного фактора.

Здесь можно выделить следующие риски:

- бессрочные;
- долгосрочные;
- краткосрочные.

- Зависимость риска от времени.

Здесь можно выделить:

- статические риски;
- динамические риски.

- Продолжительность выявления и ликвидации отрицательных последствий.

Как правило, возможно выделить риски с: краткосрочным, среднесрочным или долгосрочным выявлением негативных последствий.

Большинство рисков относится к группе с краткосрочным выявлением негативных последствий. Однако в ряде случаев, выявление ущерба может происходить через весьма продолжительные периоды времени, иногда десятилетия. Например, когда опасность какого-либо фактора выявляется не сразу.

(5) По регулярности или типичности реализации риска

Здесь критерием классификации может служить то, насколько типичен и регулярен риск для данного объекта и/или ситуации.

По данному критерию можно выделить:

- фундаментальный риск,

т.е. риск, внутренне присущий данному объекту (системе) и/или ситуации, а также риск, основанный на природных или социальных закономерностях;

- спорадический или сезонный риск,

т.е. нерегулярный риск, который вызывается редкими событиями и форсмажорными обстоятельствами; риск, вероятность которого низка.

В задачах управления риском необходимо в первую очередь учитывать фундаментальные риски, а спорадические – в соответствии с целями или иными критериями классификации.

(6) По характеру последствий реализации риска

Здесь можно выделить:

- чистый риск,

когда все исходы связаны с негативными последствиями. Примером может служить пожар;

- спекулятивный риск,

когда исходы могут быть связаны как с негативными (проигрыш), так и с позитивными (выигрыш) последствиями. Пример – игра на бирже.

Подобная классификация важна для выбора методов борьбы с этими рисками. Так, от чистых рисков защищаются страхованием, а от спекулятивных – хеджированием.

(7) По характеристике взаимодействия с другими рисками.

В реальной жизни риски встречаются не раздельно, а в совокупности. Часто эта взаимосвязь является ключевым аспектом, так как риски усиливают или ослабляют друг друга.

Критерием классификации здесь может служить степень распространенности данного риска. В этой связи можно выделить:

- массовые риски,

которые характерны для большого числа однотипных объектов; пример – автомобильные аварии;

- уникальные риски,

встречаются у отдельных объектов.

По критерию возможности индуцирования последовательной цепочки рисков можно выделить:

- первичные риски;

непосредственно связанные с неблагоприятным исходным событием;

- вторичные риски;

обусловленные последствиями первичных рисков;

- третичные риски и т.д.

Примером события здесь может служить землетрясение: разрушение плотины при этом соответствует первичному риску, а последствия наводнения, вызванного разрушением плотины, - вторичному.

(8) По характеристике масштабов риска.

Понятие масштаба (величины) риска предполагает согласованный анализ двух характеристик – частоты возникновения и размера последствий (ущерба).

Критериями классификации здесь могут выступать:

- частота возникновения ущерба; при этом можно выделить следующие классы рисков:

редкие риски,
риски средней частоты,
частые риски;

- размер ущерба – по данному критерию можно выделить:

малые риски,
средние риски,
высокие риски,
катастрофические риски;

- по критерию приемлемости можно выделить риски:

неприемлемые,
приемлемые со значительными ограничениями,
приемлемые без заметных ограничений.

(9) По возможности свободы выбора

риски можно разделить на:

- добровольные,

- вынужденные.

(10) По характеристике степени измеримости и прогнозируемости риска

По этому критерию риски можно разделить на:

- предсказуемые (прогнозируемые), которые можно предвидеть, но, как правило, невозможно предсказать момент их появления;
- непредсказуемые (непрогнозируемые) риски.

Об этих рисках, как правило, ничего не известно. Это может быть связано как с полным или частичным отсутствием информации, так и с невозможностью количественной или качественной оценки.

Для предсказуемых рисков анализ связан с получением необходимой информации.

Эта информация может быть:

- количественной,

выраженной в виде численных значений;

- качественной,

отражающей вербальное описание и/или оценочные суждения об объекте или процессе.

Частные виды классификации

Приведенный обзор критериев классификации рисков не является исчерпывающим. Все перечисленные критерии – общие, в той или иной мере присущие всем видам рисков. Для конкретных видов рисков можно выделить и специфические критерии классификации, которые тесно связаны с особенностями указанных рисков.

Так, возможно выделение специфических рисков ведения конкретного типа бизнеса, например, производственного, торгово-закупочного, страхового или банковского. При этом классификация должна отражать особенности бизнеса, учитывать конкретную экономическую ситуацию и специфику проявления рисков в конкретной сфере деятельности.

2.4.2. Восприятие риска

Реальный риск и восприятие риска могут значительно различаться. Табл. 2.1 [6] показывает различие в восприятии риска лигой женщин, студентами и экспертами для различных областей риска. Оценивалось 29 видов деятельности и технологий. Анализ таблицы показывает, что, например, риск, ассоциируемый с ядерной энергией, ставится лигой женщин и студентами на первое место, в то время как эксперты поместили его на 20-е место. Эксперты поставили риск, связанный с автомобильным транспортом на первое место, в то время как студенты на пятое.

Общественное восприятие риска и безопасности изменяются с возрастом, родом занятий, образованием, культурой и другими факторами. Индивидуумы иногда не способны оценить неопределенность, связанную с риском, что ведет к необоснованному доверию к индивидуальному восприятию риска.

Случаи смерти, связанные с редкими причинами, часто переоцениваются, а широко распространенные причины смерти часто недооцениваются. Воспринимаемый риск часто занижается при привыкании к опасности. Если бытуют неверные представления о реальности, это может привести к неверным выводам и решениям. Например, выбор способа транспортировки – поезд, автомобиль, мотоцикл, автобус, велосипед, и т.д. базируется на многих критериях, включая такие как стоимость, скорость, удобство, и безопасность. Вес и оценка критериев в выборе способа транспортировки основывается на индивидуальном восприятие безопасности, которое может значительно отличаться от реальной. Понимание этих различий в восприятии риска и безопасности является жизненно важным для управления риском и риск - коммуникаций.

2.4.3. Анализ риска систем

Система может быть определена как объект, состоящий из взаимодействующих элементов и полностью определяемый с использованием детерминистской модели. Слово *детерминированный* подразумевает, что система может быть явно описана, и нет неопределенностей в ее архитектуре. Описание системы базируется на ана-

лизе ее функциональных или рабочих характеристик. Зачастую система может быть подразделена на взаимодействующие подсистемы.

Таблица 2.1

Восприятие риска

Вид деятельности или технология	Лига женщин	Студенты	Эксперты
Ядерная энергия	1	1	20
Автомобили	2	5	1
Оружие	3	2	4
Курение	4	3	2
Мотоциклы	5	6	6
Алкогольн. напитки	6	7	3
Авиация общая	7	15	12
Работа в полиции	8	8	17
Пестициды	9	4	8
Хирургия	10	11	5
Пожарные	11	10	18
Строительство	12	14	13
Охота	13	18	23
Аэрозоли	14	13	25
Альпинизм	15	22	28
Велосипед	16	24	15
Авиация коммерч.	17	16	16
Электричество	18	19	9
Плавание	19	29	10
Контрацептивы	20	9	11
Лыжный спорт	21	25	29
Рентген	22	17	7
Спорт студенч.	23	26	26
Железные дороги	24	23	19
Консерванты	25	12	14
Красители пищев.	26	20	21
Косилки	27	28	27
Антибиотики	28	21	24
Домашняя работа	29	27	22

Оценка риска

Понятие оценки риска

Изучение риска предполагает использование аналитических методов на уровне системы, которые принимают во внимание компоненты и подсистемы и учитывают их вероятности отказов и последствия этих отказов. При этом используются количественный, качественный или полуколичественные подходы, чтобы оценить вероятности отказов и их последствия для технических систем. Систематический подход позволяет аналитику адекватно и легко оценивать безопасность и риск сложных систем при различных эксплуатационных и чрезвычайных условиях. Способность количественно оценивать эти системы помогает сокращать эксплуатационные расходы и сокращать число экстремальных ситуаций. Результаты анализа риска могут также использоваться при принятии решений, которые базируются на анализе «затраты – выгода».

Оценка риска – процесс, при котором риски для системы моделируются и определяются количественно. Проведение оценки риска предполагает получение качественных и/или количественных данных для ЛПР с целью использования в управлении риском.

Анализ и оценка риска предполагают идентификацию опасностей, оценку вероятностей событий и оценку последствий. При этом даются ответы на вопросы:

что неблагоприятное может произойти?

Какова вероятность того, что это произойдет?

Каковы последствия этого события?

Ответ на эти вопросы подразумевает использование различных методов оценки риска, которые мы и обсудим ниже.

Методология оценки риска

Процесс оценки риска предполагает использование предыдущего опыта, известных моделей оценки риска, а также всех имеющихся источников данных. При этом необходимо корректно учесть различные источники и типы неопределенности, вовлеченной в этот процесс принятия решения [6].

В этом разделе рассмотрим методологию оценки риска системы. На рис. 2.4 приведена типичная блок-схема управления системой на базе риск – методологии.

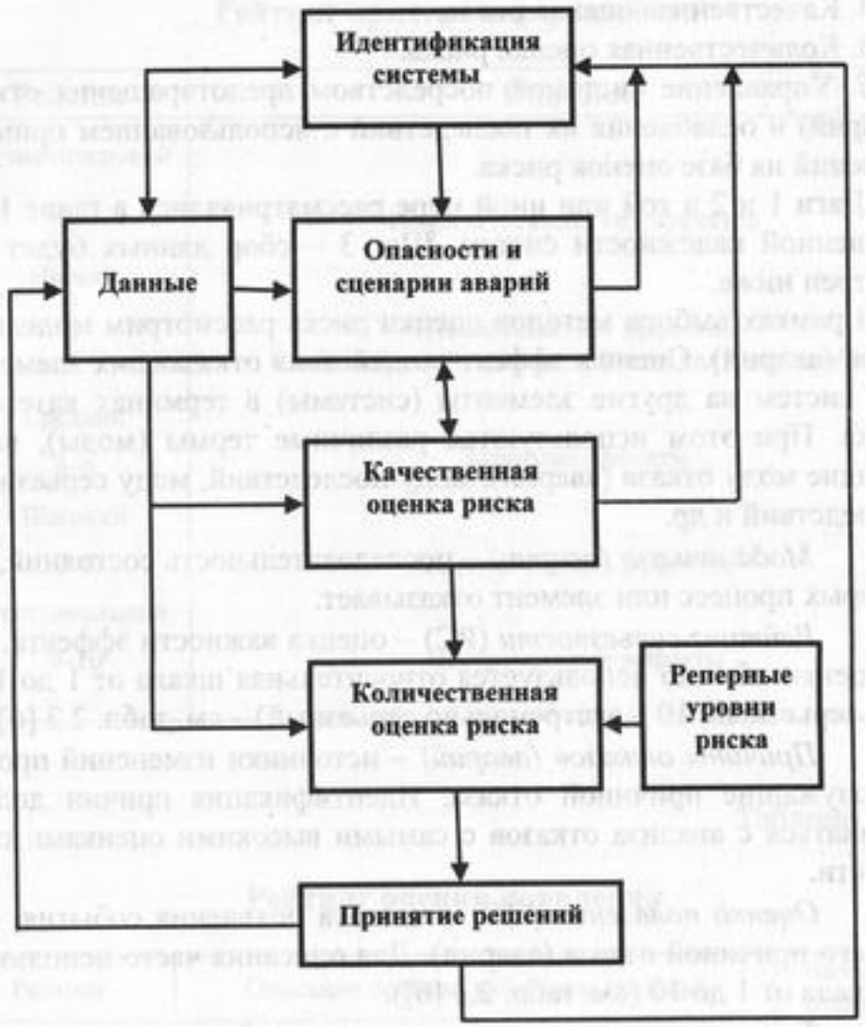


Рис. 2.4. Диаграмма риск – методологии

Методология включает следующие шаги:

1. Определение системы, а также целей и критериев анализа.

2. Анализ опасностей, определение сценариев отказов и аварий.
3. Сбор данных.
4. Качественная оценка риска.
5. Количественная оценка риска.
6. Управление системой посредством предотвращения отказов (аварий) и ослабления их последствий с использованием принятия решений на базе оценок риска.

Шаги 1 и 2 в той или иной мере рассматривались в главе 1, посвященной надежности систем. Шаг 3 – сбор данных будет рассмотрен ниже.

В рамках выбора методов оценки риска рассмотрим модели отказов (аварий). Оценим эффект воздействия отказавших элементов или систем на другие элементы (системы) в терминах категорий риска. При этом используются различные термы (моды), включающие моду отказа (аварии), моду последствий, моду серьезности последствий и др.

- *Мода отказа (аварии)* – последовательность состояний, при которых процесс или элемент отказывает.
- *Рейтинг серьезности* (РС) – оценка важности эффекта. Для ее оценки обычно используется относительная шкала от 1 до 10 (1 – не серьезный, 10 – экстремально серьезный) – см. табл. 2.2 [6].
- *Причины отказов (аварий)* – источники изменений процесса, служащие причиной отказа. Идентификация причин должна начинаться с анализа отказов с самыми высокими оценками серьезности.
- *Оценка появления (ОП)* – частота появления события, служащего причиной отказа (аварии). Для описания часто используется шкала от 1 до 10 (см. табл. 2.3 [6]).
- *Текущий контроль* – контроль, который предотвращает аварии путем выявления потенциальных отказов.
- *Оценка эффективности обнаружения* (ОЭО) – мера эффективности текущего контроля. Указывает способность текущего контроля обнаруживать скрытые причины отказа до их проявления. Характеризует вероятность того, что текущий контроль выявит дефект до его явного проявления (табл. 2.4 [6]).

Таблица 2.2

Рейтинг критериев серьезности

Рейтинг	Описание
Незначительный	
1	Незначительный; нет эффектов
Низкий	
2	Незаметный; нет эффектов
3	Слабо заметный; слабые эффекты для пользователя
Средний	
4–6	Значимые эффекты
Высокий	
7–8	Высокая степень эффектов
Экстремальный	
9–10	Экстремальные эффекты

Таблица 2.3

Рейтинг оценки появления

Рейтинг	Описание последствий отказа (аварии)	Частота отказов
Незначительный		
1	Отказ маловероятен. Никакие отказы не ассоциируются с почти идентичными	< 1 из 1,000,000
Низкий		
2	Только отдельные отказы ассоциируются с почти идентичными процессами	1 из 20,000
3	Отдельные отказы ассоциируются с идентичными процессами	1 из 4000

Продолжение табл. 2.3

Рейтинг	Описание последствий отказа (аварии)	Частота отказов
Средний		
4	Обычно ассоциируются с подобными процессами, вызвавшими случайные отказы	1 из 1000
5		1 из 400
6		1 из 80
Высокий		
7	Обычно ассоциируются с подобными процессами, которые часто приводили к отказам	1 из 40
8	Процесс не контролируется	1 из 20
Экстремальный		
9	Отказ почти неизбежен	1 из 8
10		1 из 2

Таблица 2.4

Критерий выявления дефекта до его проявления

Рейтинг	Описание
Определенность в необнаружении	
10	Контроль не может обнаружить существование дефекта
Очень низкий	
9	Контроль, вероятно, не будет обнаруживать существование дефекта
Низкий	
7–8	Контроль имеет низкий шанс на обнаружение существования дефекта
Средний	
5–6	Контроль может обнаружить существование дефекта

Продолжение табл. 2.4

Рейтинг	Описание
Высокий	
3–4	Контроля имеет хороший шанс на обнаружение существования дефекта; автоматически обнаруживается отказ
Очень высокий	
1–2	Контроля почти наверняка обнаружит существование дефекта; автоматически предотвращает дальнейшая работа

Индекс риска (ИР).

Индекс риска может быть введен как взвешенное число, используемое для рандомизации значений риска. ИР фокусирует усилия на выявлении факторов, которые обеспечивают возможность наибольших усовершенствований. Оценка риска должна быть выполнена для определения необходимости корректирующих действий. ИР рассчитывается следующим образом:

$$ИР = (ОП)(РС)(ОЭО) \quad (2.8)$$

Корректирующие действия должны сначала быть направлены на факторы, имеющие самый высокий ранг.

Цель корректирующих действий состоит в том, чтобы уменьшить оценки серьезности, появления и обнаружения. Усилия должны быть нацелены на предотвращение отказов (аварий) путем контроля или устранения их причин. Особое внимание должно быть направлено на ситуации с ИР больше чем 125.

Матрица риска

Риск может быть оценен и представлен с использованием матриц, что позволяет проводить предварительное субъективное оценивание вероятности и последствий качественным образом. Матрица риска – двухмерное представление вероятности и последствий с использованием качественной метрики для обоих измерений. Согласно этому методу, риск характеризуют, проводя категоризацию

вероятности и последствия по двум осям матрицы. Матрицы риска являются удобным инструментом для наглядного представления риска. Они могут использоваться сами по себе, или как первый шаг в количественном анализе риска. Независимо от используемого подхода, анализ риска должен представлять собой процесс в динамике – то есть процесс, где оценки риска повторно исследованы и адаптированы. Какие-либо действия или бездействие в одной области деятельности могут повлиять на риск в другой области деятельности; поэтому необходимо непрерывное обновление информации о риске.

Вероятностная метрика может быть построена с использованием категорий, представленных в табл. 2.5 [6], а метрика последствий с использованием категорий, табл. 2.6 [6]. Пример категории последствий приведен в табл. 2.7 [6].

Таблица 2.5

Категории вероятностей для матрицы риска

Категории	Описание	Диапазон вероятностей (годовые)
A	Возможно (Likely)	≥0.1 (1 из 10)
B	Маловероятно (Unlikely)	≥0.01 (1 из 100) но <0.1
C	Очень маловероятно (Very unlikely)	≥0.001 (1 из 1000) но <0.01
D	Сомнительно (Doubtful)	≥0.0001 (1 из 10,000) но <0.001
E	Крайне маловероятно (Highly unlikely)	≥0.00001 (1 из 100,000) но <0.0001
F	Чрезвычайно маловероятно (Extremely unlikely)	<0.00001 (1 из 100,000)

Категории вероятностей табл. 2.5 фокусируются на здоровье человека и экологических аспектах последствия. Категории последствия табл. 2.7 отражают экономические воздействия и должны быть адаптированы к конкретным приложениям. Пример матрицы риска приведен на рис. 2.5 [6]. Каждая клеточка на нем затемнена в соответствии с субъективно воспринимаемым уровнем риска. Использованы три уровня риска: низкий – Low (L), средний – Medium (M) и высокий – High (H). Их можно сопоставить, соответственно, с пренебрежимым, приемлемым и неприемлемым уровнями риска.

Таблица 2.6

Категории последствий для матрицы риска

Категории	Описание	Примеры
I	Катастрофические (Catastrophic)	Большое количество смертей и/или значительное долгосрочное экологическое воздействие
II	Значительный (Major)	Смертельные случаи и/или значительное кратковременное экологическое воздействие
III	Серьезные (Serious)	Серьезные повреждения и/или существенное экологическое воздействие
IV	Существенные (Significant)	Незначительные повреждения и/или кратковременное экологическое воздействие
V	Незначительные (Minor)	Небольшие повреждения и/или минимальное экологическое воздействие
VI	Никакие (None)	Отсутствуют существенные последствия

Таблица 2.7

Пример категорий последствий для матрицы риска

Категории	Описание	Стоимость, $
I	Катастрофические потери (Catastrophic)	≥$10,000,000,000
II	Значительные потери (Major)	≥$1,000,000,000 но <$10,000,000,000
III	Серьезные потери (Serious)	≥$100,000,000 но <$1,000,000,000
IV	Существенные потери (Significant)	≥$10,000,000 но <$100,000,000
V	Незначительные потери (Minor)	≥$1,000,000 но <$10,000,000
VI	Несущественные потери (Insignificant)	<$1,000,000

Вероятностные категории	A	L	M	M	H	H	H
	B	L	L	M	M	H	H
	C	L	L	L	M	M	H
	D	L	L	L	L	M	M
	E	L	L	L	L	L	M
	F	L	L	L	L	L	L
		VI	V	V	III	II	I
	Категории последствий						

Рис. 2.5. Пример матрицы риска

Другие уровни риска можно добавить, используя расширенную шкалу, например, с пятью или семью значениями вместо трех, если это необходимо.

Матрица риска, представленная выше, не учитывает потенциальную выгоду при отсутствии неблагоприятных событий или при появлении благоприятного исхода. В качестве примера вероятности и денежно-кредитные категории могут быть расширены, как это представлено в табл. 2.8 и 2.9., соответственно. Это дает возможность представить возможные выгоды.

Таблица 2.8

Расширенные категории вероятностей для матрицы риска

Категория	Описание	Диапазон вероятностей (годовые)
AA	Очень Возможно (Very likely)	≥0.8
A	Возможно (Likely)	≥0.1 (1 из 10) но <0.8
B	Маловероятно (Unlikely)	≥0.01 (1 из 100) но <0.1
C	Очень маловероятно (Very unlikely)	≥0.001 (1 из 1000) но <0.01
D	Сомнительно (Doubtful)	≥0.0001 (1 из 10,000) но <0.001
E	Крайне маловероятно (Highly unlikely)	≥0.00001 (1 из 100,000) но <0.0001
F	Чрезвычайно маловероятно (Extremely unlikely)	<0.00001 (1 из 100,000)

Таблица 2.9

Пример категорий последствий для матриц риска

Категория	Описание	Стоимость, $
I	Катастрофические потери (Catastrophic)	≥$10,000,000,000
II	Значительные потери (Major)	≥$1,000,000,000 но <$10,000,000,000
III	Серьезные потери (Serious)	≥$100,000,000 но <$1,000,000,000
IV	Существенные потери (Significant)	≥$10,000,000 но <$100,000,000
V	Незначительные потери (Minor)	≥$1,000,000 но <$10,000,000
VI	Несущественные потери (Insignificant)	<$1,000,000
I+	Несущественный выигрыш (Insignificant gain)	<$1,000,000
II+	Существенный выигрыш (Significant gain)	≥$1,000,000 но <$10,000,000
III+	Значительный выигрыш (Major gain)	≥$10,000,000

Соответствующая матрица риска приведена на рис. 2.6.

H+	H+	M+	AA						
H+	M+	L+	A	L	M	M	H	H	H
M+	L+	L+	B	L	L	M	M	H	H
			C	L	L	L	M	M	H
			D	L	L	L	L	M	M
			E	L	L	L	L	L	M
			F	L	L	L	L	L	L
III+	II+	I+	Вероятностные категории	VI	V	IV	III	II	I
Категории выигрыша				Категории потерь					

Рис. 2.6. Пример матрицы риска с потенциальными выигрышами.

В соответствии с рис. 2.6 потенциальные выигрыши сгруппированы на трех уровнях: низкий ожидаемый выигрыш (L+), средний ожидаемый выигрыш (M+), высокий ожидаемый выигрыш (H+). Сценарии, ведущие к высокому выигрышу (прибыли), должны отслеживаться для содействия их реализации.

Качественная и количественная оценки риска

Методы оценки риска могут также быть отнесены к качественным или количественным в соответствии с тем, как риск определяется. Качественный анализ риска использует суждения и мнения экспертов, чтобы оценить вероятности и значения последствий неблагоприятных событий. Эффективность этого субъективного подхода для оценки риска системы зависит от имеющихся ресурсов. Количественный анализ полагается на вероятностные и статистические методы, а так же на базы данных, которые предоставляют числовые значения вероятностей и последствий для оценки риска. Этот объективный подход оценки риска предполагает исследование системы с большей степенью детализацией.

Выбор количественного или качественного метода зависит от наличия данных для оценки опасности и необходимого уровня анализа для принятия решения. Качественные методы предлагают исследования без детальной информации, но интуитивные и субъективные процессы могут приводить к различным результатам в зависимости от того, кто использует их. Количественный анализ в целом обеспечивает большее понимание среди различных индивидуумов, но требует более качественных данных для получения результатов. Комбинации качественного и количественного анализов могут использоваться в зависимости от ситуации.

Расчеты риска предполагают наличие аппроксимаций значений вероятностей отказов для заданных уровней принятия решения. Вероятности отказов могут быть оценены в форме «пожизненной» вероятности отказа, «годовой» вероятности отказа, среднего времени между отказами, или частоты отказов. Оценки могут быть представлены в числовой или нечисловой формах. Пример числовой формы для «годовой» вероятности отказа – 0.00015; среднего времени между отказами – 10 лет.

Пример нечисловой формы для «годовой» вероятности отказа – «большая»; для среднего времени между отказами – «среднее». В последней, нечисловой форме, предполагается наличие информации относительно значений таких понятий как «большой», «средний», «маленький», «очень большой», «очень маленький», и т.п. Выбор формы представления должен базироваться на наличии доступной информации, способности персонала работать с числовой или нечисловой информацией и делать правильные выводы при формулировке итогового решения.

Виды последствий отказов (аварий), которые необходимо учитывать, включают прекращение производства, ущерб собственности, экологический ущерб, а также потеря человеческой жизни и ущерб, не связанный со смертельным исходом. Расчеты риска предполагают наличие аппроксимированных значений последствий (ущерба) для заданного уровня принятия решения. Подобные оценки также могут быть в числовой или нечисловой формах. Пример числовой формы последствия прекращения производства – 1000 единиц; нечисловой формы – «большой». Аналогично вероятностям для нечисловой формы последствий отказов предполагается наличие информации относительно значений таких понятий как «большой», «средний», «маленький», «очень большой», «очень маленький» и т.п. Выбор формы также должен базироваться на наличии и пригодности информации, способности персонала представить ее в той или иной форме и важности наличия числовой или нечисловой информации при формулировке итогового решения.

Оценки риска могут быть определены в теоретико-множественном представлении как комбинация (пересечение, объединение) соответствующих событий или как результат агрегирования вероятностей и последствий (ущербов). На практике, как правило, ограничиваются арифметическим умножением соответствующих числовых значений.

Как альтернатива для большинства ситуаций, встречающихся на практике, могут быть представлены графики зависимости вероятностей от последствий (ущерба), которые позволяют осуществить приблизительное ранжирование их на группы в соответствии с оценками риска, вероятностью отказа и/или последствиями отказа (ущерба).

2.4.4. Риски, обусловленные человеком

Оценка риска требует проведения анализа системы, составленной из разнообразных групп компонентов. Люди также являются составной частью большинства систем, и они также дают существенный вклад в риск. Этот вклад зачастую называют «человеческим фактором». Согласно оценкам, человеческие ошибки в отдельных случаях являются причиной почти 90 % аварий и катастроф. Человеческий вклад в риск может быть оценен путем изучения мотивации с привлечением знаний из психологии. При этом как отказы техники, так и ошибки человека должны учитываться при анализе и оценках риска. Как только вероятности ошибок человека определены, отказы, связанные с человеком, рассматривают при выполнении оценок риска тем же самым способом, что и отказы техники.

Вклад человека в риск определяют с учетом анализа надежности человека как части системы человек-машина. Анализируется воздействие людей на надежности и безопасности систем. Важный результат такого анализа – определение вероятностей человеческих ошибок, а также рекомендации, в соответствии с которыми человеческие ошибки могут быть уменьшены. В комбинации с известными методами оценки риска технических систем это позволяет проводить учет эффектов влияния человека на работу систем. Анализ надежности человека обычно представляют состоящим из трех основных частей: ошибок идентификации, моделирования и логических ошибок.

Другие источники рисков, обусловленных человеком, могут быть связаны, например, с саботажем, терроризмом. Опасность в этом случае носит интеллектуальный характер. Методы, рассмотренные выше, не могут быть полностью применимыми в этом случае. Сценарии угроз в этой ситуации имеют динамический характер, что накладывает отпечаток на разработку соответствующих моделей управления для противодействия угрозе. В этом случае может оказаться необходимым использовать методы теории игр в комбинации с другими методами анализа риска, теориями принятия решений и управления.

Идентификация ошибок человека

Идентификация ошибок человека важна для проведения полной и адекватной оценки риска. Для этого нужно иметь соответствующие модели, описывающие ошибки человека в технической системе. Идентификация человеческих ошибок требует знаний о взаимодействиях человека с другими людьми и машинами. Изучение этих взаимодействий позволяет прояснить причины ошибок человека. При этом большое значение имеет определение содержания вида деятельности, наличие информации о навыках и умении индивидуума, учет психологических и психофизических характеристик человека. Необходим и учет работоспособности человека в ее динамике. На рис. 2.7 в качестве примера представлены фазы работоспособности человека в течение рабочего дня.

Фазы работоспособности включают: I – предрабочее состояние, II – врабатываемость, III – устойчивый период, IV – утомление, V – возрастание продуктивности за счет эмоционально-волевого напряжения, VI – прогрессивное снижение продуктивности, VII – восстановление функций.

Учет динамики работоспособности человека может позволить уменьшить вероятность ошибок человека. Информация для того, чтобы идентифицировать ошибки человека может быть получена из анализа задачи, суждений экспертов, лабораторных исследований, моделирования, и из литературы.

Ошибки человека могут иметь различную природу. Важно обратить внимание на различие между ошибками человека и человеческими факторами.

Ошибки человека обычно рассматривают отдельно от анализа человеческих факторов, который использует информацию о человеческом поведении, способностях, ограничениях, психологических, психофизиологических, антропометрических и других характеристиках человека, важных для разработки инструментов, механизмов, рабочих мест и организации окружающей среды для безопасной, удобной и эффективной работы человека.

Человеческие факторы определяют, выполняя исследования популяции и проводя эксперименты на рабочих местах. Анализ человеческий факторов одновременно вносит вклад в анализ надежности человека.

Рис. 2.7. Фазы работоспособности человека в течение дня.

Необходимо отметить, что однозначное, всеобъемлющее определение ошибки человека дать трудно. В литературе приводится большое число подобных определений. Интуитивно, ошибки человека - нежелательные обстоятельства, вызванные людьми, которые приводят к отклонению от нормального функционирования системы. Из аналогии человека с техническими системами ошибка человека может быть определена как «вероятность того, что человек не в состоянии обеспечить выполнение требуемых функций». В этом определении сосредотачиваются на последствиях и не содержится никаких ссылок на то, почему ошибка произошла.

Концепции ошибок человека должны исходить из того, что недостаточно рассматривать ошибки и их последствия просто как результат индивидуального человеческого отказа. Несчастные случаи – почти всегда результат многократных ошибок или комбинация ошибок человека с уязвимостью системы. Ниже рассмотрены

два подхода к определению ошибок человека: инженерный и базирующийся на анализе инцидентов.

1. Инженерная концепция ошибок

Ошибки человека можно классифицировать различными способами. Например, в монографии [11] предлагается распределить их по трем уровням. К первому уровню относятся факторы, зависящие от индивидуальных особенностей, ко второму – ситуационные факторы и к третьему – нежелательные события. При этом виды ошибок для системы «человек - машина» предлагается классифицировать следующим образом:

- Ошибки проектирования.
- Операторские ошибки.
- Ошибки изготовления.
- Ошибки технического обслуживания.
- Привнесенные ошибки (причиной которых может быть как человек, так и оборудование).
- Ошибки контроля.
- Ошибки обращения.
- Ошибки организации рабочего места.
- Ошибки управления.

Meister [12] разделяет ошибки человека на четыре группы:

- неправильное выполнение необходимого действия,
- пропуск требуемого действия,
- выполнение требуемых действий в неправильной последовательности,
- выполнение нетребуемого действия.

Дополнительная группа может быть связана с невыполнением требуемого действия в пределах заданного времени.

Это особенно актуально в ситуациях, где человеческое вмешательство требуется в ответ на потенциально опасную ситуацию. Вышеупомянутое описание, строго говоря, является скорее классификацией, чем определением ошибки, так как рассматриваются некие характеристики как первый вариант определения, описывая то, что случилось, а не почему это случилось.

2. Ошибка человека как причина инцидента

Анализ несчастных случаев показывает, что они редко возникают из-за единственной человеческой ошибки или отказа элемента. Чаще причиной является комбинация инициирующего события (техника или человек) и исходных условий, как то – ошибки проектирования, отказы обслуживания, дефицит вспомогательных вычислительных средств и пр.

Поэтому целесообразно делать различие между активными и латентными (скрытыми) ошибками или отказами. Активная человеческая ошибка имеет немедленный эффект и непосредственно обусловливает опасное состояние системы или является прямым инициатором цепи событий, которые быстро ведут к нежелательному состоянию.

Другая категория латентных ошибок может произойти на уровне проектирования или управления.

В качестве итоговых определений ошибок можно ввести следующую градацию:

- Активная ошибка: активная человеческая ошибка есть непреднамеренное действие или преднамеренное действие, базирующееся на ошибочном диагнозе, интерпретации или другом отказе, которое не демпфируется и имеет существенные отрицательные последствия для системы.
- Скрытая ошибка (эксплуатационный уровень): скрытая человеческая ошибка подобна активной ошибке, но последствия ошибки могут проявиться после некоторого времени или в комбинации с другими ошибками, или специфическими эксплуатационными условиями.
- Скрытая ошибка (уровень управления): ошибка человека уровня управления есть неадекватная или запрещенная политика управления, которая создает предварительные условия для активного или латентного отказа (ошибки) человека, техники или программных средств.
- Нарушение: нарушение происходит, когда выполняется действие, которое преднамеренно игнорирует известные эксплуатационные правила, ограничения или процедуры. Однако это определение исключает действия, которые осуществляются преднамеренно, чтобы повредить системе, и относящиеся к категории саботажа.

- Ошибка восстановления: отказ происходит, если потенциально восстанавливаемая активная или скрытая ошибка не обнаружены, или корректирующее действие не предпринято до того, как негативные последствия ошибки проявляются.

На вышеупомянутых определениях, термин "ошибка" используется для случая ошибки самой по себе, а "отказ" для последствий ошибки.

Моделирование ошибок человека

Как только ошибки человека идентифицированы, они должны быть представлены в логической и поддающейся количественному описанию структуре наряду с другими компонентами, которые вносят вклад в риск системы. Эта структура может быть определена путем развития моделей риска. В настоящее время нет согласия в том, как достоверно моделировать ошибки человека. Предложены различные модели, использующие деревья событий и деревья ошибок человека, чтобы предсказывать параметры его надежности. Оценки частот отказов человека обычно основываются на тестах, моделировании и экспертных оценках.

Количественное определение ошибок человека

Количественное определение ошибок человека способствует включению индивидуума в контекст анализа риска. Это развивающаяся отрасль, которая требует знания физиологии человека, особенностей когнитивных процессов и особенностей человеческого восприятия. Поскольку точная модель человеческого познания отсутствует, большая часть текущих данных по надежности человека основывается на имеющихся базах данных по несчастным случаям, моделировании и других эмпирических подходах. Многие из существующих данных были получены, например, в ядерной и авиационной промышленности.

Результат количественного определение ошибок человека в терминах вероятности их появления характеризуется как вероят-

ность ошибок человека. Были развиты различные методы для того, чтобы помочь предсказывать вероятность ошибок человека. Предсказание вероятностей ошибок человека – один из наиболее широко используемых методов для количественного определения этих вероятностей. Он базируется, как правило, на данных, собранных в ядерной и химической индустрии с использованием деревьев событий.

На степень «надежности» человека влияет много факторов, затрагивающих способность людей выполнить требуемые задачи. Внутренние факторы включают индивидуальные признаки человека (опыт, уровень интеллекта, навыки, способности, установки), которые затрагивают способность человека выполнять конкретные задачи. Внешние факторы – динамические аспекты ситуации, задачи и техника, которые затрагивают способность выполнять эти задачи. Типичные внешние факторы включают, например, стрессовые факторы (высокая температура, холод, шумовое поле, ситуативное напряжение, время дня), ограничения времени и качество интерфейса человек – машина. Обучение может помочь повысить «надежность» человека.

Организация баз данных об ошибках человека.

Базы данных об ошибках человека можно разделить на три категории [11]:

1. Базы экспериментальных данных.

Они включают результаты экспериментальных работ в лабораторных условиях. Заслуживают большого доверия. Однако не нужно забывать, что несмотря на тщательность их формирования, в них всегда присутствует элемент субъективизма.

2. Базы эксплуатационных данных.

Более адекватны реальной ситуации, однако формировать их весьма затруднительно, так как это требует тщательной регистрации действий в реальных условиях эксплуатации.

Известны различные базы эксплуатационных данных. Как правило, они применимы только в конкретных ситуациях, ограниченных жесткими рамками. Например, можно привести оценки ошибок оператора из хорошо известного специалистам документа WASH-1400.

- Выбор не простого переключателя, а управляемого при помощи ключа при отсутствии ошибки в принятии решения – частота ошибок 10^{-5}.
- Выбор переключателя, не похожего по форме или по расположению на нужный переключатель при отсутствии ошибки в принятии решения – частота ошибок 10^{-4}.
- Обычная ошибка человека при выполнении операции (например, в результате неправильного считывания таблички под переключателем) – частота ошибок 3×10^{-3}.
- Обычная ошибка человека (упущение) при отсутствии индикации о параметре, упущенного оператором – частота ошибок 10^{-2}.
- Простые арифметические ошибки при проведении самопроверки без выполнения повторных вычислений – частота ошибок 3×10^{-2}.
- Ошибки неправильного переключения. Частота ошибок – 1/X. X – число неправильных переключателей, расположенных рядом с правильным переключателем. Формула применима, если имеется до пяти-шести переключателей.
- Персонал другой смены не проверяет оборудование, если нет письменной директивы или специального перечня для проверки – частота ошибок 10^{-1}.
- Обычная частота ошибок при условии напряженной работы оператора, при которой очень быстро происходят опасные действия – частота ошибок 0.2 – 0.3.

3. Базы экспертной информации.

Не требуют значительных затрат. Для использования этой субъективной информации при анализе надежности человека, следует:

- обеспечить необходимую точность данных ;
- обеспечить представительность экспертных оценок. Для этого в качестве экспертов следует использовать только высококвалифицированных специалистов ;

• правильно установить уровень экспертного оценивания. Выявить факторы, определяющие качество оцениваемой работы и определить типы ошибок, характерных для оцениваемого процесса;
• четко определить процедуру оценивания. Например, это может быть метод парного сравнения.

Имея данные, например, о вероятностях ошибок человека, возможно включение человека в качестве самостоятельного объекта в модели оценки риска.

2.5. ПОСЛЕДСТВИЯ И ТЯЖЕСТЬ АВАРИИ

Отказы (аварии) технических систем могут приводить к серьезным последствиям. Поэтому необходимо оценивать потенциальные последствия отказа. Методы оценки могут базироваться на:

• аналитических моделях, использующих экономические категории,
• собранных данных об инцидентах.

В оценках последствий и тяжести аварии (ущерба) неопределенность может быть смоделирована путем использования случайных переменных с заданными функциями распределения вероятностей и их параметрами.

В качестве *последствий* аварии может возникнуть пожар, взрыв, газовое облако, повреждения, смертные случаи, негативные эффекты для здоровья, окружающей среды, убытки. *Тяжесть* аварии - качество, условие, серьезность, или интенсивность последствий аварии.

Ущерб не всегда может быть оценен с уверенностью, но предпочтительно определять его в денежном выражении. Неопределенный характер тяжести аварии предполагает его оценку в терминах вероятности. Тяжесть аварии является оценкой потенциальных потерь, которые могут включать потерю людей, собственности, способность производить продукцию, ухудшение состояния дикой природы, окружающей среды и т.д. Их также следует определять в денежном выражении или в терминах полезности потерь. Например, выброс ядовитого вещества можно охарактеризовать количеством этого вещества. При этом может быть причинен ущерб здоровью людей. При взрыве могут пострадать строения и люди. При этом материальные потери можно представить в денежном выражении, для материального выражения жизни и здоровья людей требуются специальные подходы.

Неопределенность ущерба привела к появлению специфических мер типа *максимальная возможная потеря* и *вероятная максимальная потеря,* для оценки, соответственно, максимальной потери, которая может произойти при наихудшем стечении обстоятельств и потери, которая базируется на наиболее вероятной комбинации обстоятельств. Например, в случае пожара в доме полную потерю здания можно рассматривать как *максимальная возможная потеря*, тогда часть этой полной потери можно рассматривать как *вероятная максимальная потеря*. Подобная градация ущербов используется при страховании объектов.

Каждая авария системы характеризуется определенным ущербом. Он может определяться экономическими категориями типа уменьшение производительности, временной или постоянной потерей продукции, потерей капитала. Ущерб может выразиться и в более серьезных событиях типа экологического бедствия, потери человеческой жизни, ухудшения здоровья или общественной угрозы. Оценки ущерба базируются или на событиях в прошлой истории, или на научном прогнозе, использующем специальные методы.

Каждый вид аварии должен характеризоваться определенными уровнями ущерба, чтобы оценить риск. Как правило, последствия аварии могут быть описаны в виде численных значений или значений стандартизированных индексов.

Один из самых трудных и дебатируемых этапов в определении риска связан с оценкой ущерба. Например, величину ущерба собственности можно определить, оценив расходы, которые необходимо понести для замены или восстановления ущерба, вызванного аварией. Однако оценка других видов ущерба не является столь простым мероприятием. Два вида ущербов, наиболее трудно поддающихся оценке, это потеря человеческой жизни и ущерб окружающей среде. Один из способов количественной оценки этих ущербов – соотнесение различных уровней ущербов с различными катего-

риями. Например, любые случаи, которые приводят к потере одной - двух жизней, могли бы быть отнесены к 4-й категории ущерба; случаи, которые приводят к потере трех - четырех жизней к 3-й категории; пяти - шести жизней ко 2-й категории; семи или больше жизней к 1-й категории.

В этом смысле различным группам людей, имеющим различные уровни ценности по какому-либо критерию, могут быть приписаны определенные значения ущербов.

Ниже рассмотрены возможные методы оценки материальных видов ущербов, а также ущербов для жизни человека. Они могут быть адаптированы и для оценки других типов ущербов, например, экологического.

2.5.1. Аналитическая оценка ущерба

Диаграммы «причины – последствия»

Ущерб от аварии может быть оценен с использованием диаграммы «причины – последствия» (ПП). Эти диаграммы были разработаны для оценки последствий аварий, используя структуру дерева с достаточным уровнем детализации. В соответствии с ПП анализ начинается с отбора критического случая, который обычно выбирается как удобная отправная точка для развития ПП диаграммы. Для заданного критического случая последствия прослеживаются, используя логические деревья со звеньями, соответствующими событиям. Причем используется как прямая логика (как в деревьях событий), так и обратная (как в деревьях отказов). Методика построения ПП диаграмм может на любой стадии анализа использовать ответы на набор вопросов. Вопросы могут включить, например, следующие:

• Может этот случай привести к другим отказам (авариям)?

• Какие условия необходимы, чтобы это событие привело к другим событиям?

• Какие другие компоненты затрагивает это событие?

• Какие другие события вызваны этим событием?

• Какие последствия связаны с другими (последующими) событиями?

• Каковы вероятности возникновения последующих событий или вероятности отказа компонентов?

Материальный ущерб

Оценка материального ущерба в результате аварии может быть выражена в денежных единицах с использованием экономических моделей. Структура и эффективность таких моделей зависят от вида опасностей. При этом потери могут включить машины и оборудование, обстановку, сырье и материальные запасы.

Чтобы оценить потери, иногда используется стоимость замены, учитывающая стоимость восстановления собственности с подобным видом и качество. Первичное различие между ними – обесценивание.

Человеческие жертвы

Аварии могут приводить к человеческим жертвам. Поэтому при разработке технических систем необходимо использовать подходы, обеспечивающие максимальные выгоды для общества и минимальную вероятность человеческих жертв и ущерба здоровью (например, метод «затрат - результатов»). Для оптимизации общего эффекта необходимо выражать возможные последствия здоровью и потенциальные человеческие жертвы в тех же единицах, что и выгоды для общества. Соответственно, в анализе используется категория, связанная с оценкой человеческой жизни.

Потребность учета возможных человеческих жертв, а также мер для их исключения приводят к необходимости оценки безопасности жизни человека в стоимостном выражении. В [1] рассмотрено пять подходов, предложенных для придания денежного выражения мерам по обеспечению безопасности в рамках оценок «затрат - результатов»:

- *Косвенная стоимость.*

Безопасность человека оценивается в соответствии со стоимостью мероприятий, проводимых с целью уменьшения риска смерти.

- *Личный капитал.*

Безопасность оценивается как часть заработка индивидуума, связанного с риском.

- *Страхование.*

Безопасность оценивается на основе суммы личного страхования.

- *Судебные выплаты.*

Выплаты по решению суда в качестве компенсации за потерю жизни берутся за основу для определения размера стоимости безопасности.

- *Добровольны платы.*

Оценивается уменьшение риска по величине добровольной платы за меры безопасности.

Все приведенные методы так или иначе зависят от доходов индивидуумов, связанных с риском, и от действующих юридических норм. Для проведения корректных оценок в рамках «затрат - результатов» следует учитывать причину смерти и другие обстоятельства. Например, в США при потере трудоспособности суд зачастую принимает решение выплатить больше, чем при смертельных исходах.

В качестве примера рассмотрим вариант оценки безопасности человеческой жизни в стоимостном выражении с использованием метода добровольных платы.

Метод добровольной платы базируется на статистических оценках готовности группы людей заплатить за уменьшение вероятности смерти или ущерба здоровью.

Например, если люди из популяция в 100 000 человек готовы заплатить в среднем по 50 долларов каждый, чтобы уменьшить смертные случаи с 4 из 100 000 до 2 из 100 000, то общая добровольная плата может быть определена как 5 миллионов долларов и стоимость человеческой жизни будет оценена в 2.5 миллиона долларов, поскольку при этом две жизни могут быть спасены. В зарубежной литературе подобные значения называют иногда статистической стоимостью человеческой жизни. Как правило, значения оценок, полученные этим методом, превосходят значения оценок стоимости человеческой жизни, полученные другими методами.

Метод добровольной платы использует понятие максимизации социального благополучия. Оценивается готовность индивидуумов заплатить за безопасность, а затем агрегируются оценки всех затронутых индивидуумов. Экономисты одобряют этот метод, потому что теоретически он отражает реальную стоимость безопасности человека. На виртуальном рынке продаж безопасности этот подход привел бы к цене, которую потребители будут охотно платить за свою безопасность.

Типичные оценки стоимости человеческой жизни

Результаты оценок (статистической) стоимости жизни человека сильно варьируются в зависимости от источника данных, используемой методологии и сделанных предположений. Компиляция данных, базирующихся на концепции добровольной платы, дает медианное значение в 2.6 миллионов долларов (в ценах 1990 года). Гистограмма стоимости жизни человека, построенная с использованием этих данных, приведена на рис. 2.8 [2].

Рис. 2.8. Значения стоимости жизни человека

Значения стоимости человеческой жизни, используемые при транспортных катастрофах с человеческими жертвами в США (в ценах 1990 года) оцениваются от 50 000 долларов до 29 000 000 долларов, с медианой 312 000 долларов. Вариации отражают различия в восприятиях риска обществом.

В 2001 году офис министерства транспорта США установил минимальное значение стоимости для предотвращения смертельного исхода в инцидентах в 3 миллиона долларов.

Комиссия США по безопасности изделий для потребителей установила аналогичную шкалу для оценки стоимости жизни человека в диапазоне от 80 000 долларов до 1 400 000 долларов (в ценах 1990 года).

Департамент безопасности труда США приводит диапазон шкалы для стоимости жизни от 130 000 долларов до 91 миллиардов долларов с оценкой значения медианы в 6.7 миллионов долларов.

Агентство по охране окружающей среды США установило диапазон оценок для стоимости жизни от 9 000 долларов до 4.4 миллиардов долларов. Медианное значение оценивается в 21.5 миллиона долларов. При этом отдельно выделяются некоторые вещества, подлежащие регулированию (например, бензол, асбест, мышьяк и др.). Здесь шкала оценок лежит в диапазоне от 200 000 долларов до 20 миллионов долларов (100 миллионов долларов по другим оценкам).

Диапазон оценок стоимости жизни, связанных с радоном в жилых домах, лежит в пределах от 4 миллионов долларов до 7 миллионов долларов. При этом эффективным для 50-летнего периода жизни считается расход в 4 000 долларов для сокращения объемной активности на один пикокюри/литр (стоимость жизни 400 000 долларов).

Министерство труда и отдел медицинского обслуживания приводит диапазон от 12 000 долларов до 85 миллионов долларов с оценкой медианы в 265 000 долларов.

Общий анализ данных различных ведомств дает диапазон стоимости жизни от 300 000 долларов до 6.5 миллионов долларов (в ценах 1990 года). Оценка медианы (возможно, не слишком надежная) – 1.4 миллиона долларов.

Ранения

В табл. 2.10 приведена шкала серьезности ранений, предложенная в 1969 году и критически пересмотренная за прошедшее время.

Таблица 2.10

Шкала серьезности ранений

Код серьезности ранения	Серьезность ранения	Определение	Множитель (%)	Величина добровольной платы (доллары, 2001г.)
1	Легкий	Повреждения кожи; растяжение связок; ожог первой степени; травма головы с головной болью или головокружение	0.2	6000
2	Средний	Рваная рана; сотрясение мозга (потеря сознания менее 15 минут); раздробление (ампутация) пальца; закрытый перелом таза	1.55	46 400
3	Серьезный	Разрыв нерва; многократный перелом ребер; контузия органа брюшной полости; раздробление (ампутация) руки (ноги)	5.75	172 500
4	Тяжелый	Разрыв селезенки; перелом ноги; перфорация грудины; сотрясение мозга с другими неврологическими признаками (потеря сознания менее чем на 24 часа)	18.75	562 500
5	Критический	Спинно-мозговая рана; ожог 3-й степени; сотрясение мозга с серьезными неврологическими признаками (потеря сознания более чем на 24 часа)	76.25	2 287 500
6	Смертельный	Ранения хоть и не фатальные, но заканчивающиеся смертью в течение 30 дней после инцидента	100.00	3 000 000

Серьезность ранения оценивается по шкале 1 – 6, где 1 является незначительным (легким), 5 – критическим, и 6 – неспособным к выживанию. Этот масштаб характеризует угрозу жизни, связанную с конкретной раной и не предназначен для того, чтобы выражать всестороннюю меру серьезности.

Приведенная шкала не является выражением арифметического масштаба раны, то есть разница между уровнями с кодами 1 и 2, не то же самое, что между 4 и 5; то есть, мы имеем дело с порядковой шкалой.

Табл. 2.10 показывает соотношение между шкалой серьезности ранения и фракцией (частью) величины добровольной платы. Эта фракция, выражаемая в процентах, отражает потерю качества жизни и количества лет жизни, типичного для данного уровня ранения.

В дополнение к значениям добровольной платы департамент транспорта США идентифицирует и другие затраты, связанные с ранениями и смертельными исходами, обусловленными транспортировкой, включая затраты в связи с чрезвычайными обстоятельствами, медицинским обслуживанием, юридическим обслуживанием и судебными издержками. Поскольку медицинские и судебные издержки, связанные с отдельными видами ранений, могут быть специфическими, они представлены отдельно в табл. 2.11. В ней приведены медицинские и судебные издержки в долларах (цены 2001 года) на одного пострадавшего для авиационных происшествий. Приведенные в таблице значения, нужно добавить к сумме оценки за ущерб конкретного индивидуума.

Таблица 2.11

Медицинские и судебные издержки ($), при ранениях

Код серьезности ранения	Серьезность ранения	ЧС и медицинские издержки	Юридические и судебные издержки	Полная стоимость
1	Легкий	600	1900	2500
2	Средний	4600	3100	7100
3	Серьезный	16,500	4700	21 200
4	Тяжелый	72,500	39,100	111 600
5	Критический	219,900	80,100	300 000
6	Смертельный	52,600	80,100	132 700

Косвенные потери

Косвенные потери являются потерями второго порядка, вызванными прямыми потерями. Они могут классифицироваться как независимые от времени или зависимые от времени потери. Например, потеря здания включает прямые потери его стоимости и косвенные потери из-за неиспользования здания, которые есть функция времени. Независимые от времени потери могут быть связаны, например, с потерей какой-либо части гардероба. Косвенные потери также включают потери из-за закрытия бизнеса или его сокращения. Они могут включать обесценивание; неспособность выплатить задолженности, зарплату персоналу, оплатить рекламные и сервисные расходы; а также обязательства по субконтрактам. Полная потеря также зависит от периода прерывания деятельности. Некоторые виды коммерческой деятельности необходимо продолжать, что ведет к дополнительным потерям из-за более высоких расходов на аренду, оплату персонала и материалов. Косвенные потери могут также быть связаны, например, с худшими показателями комплектующих или материалов для какого-либо изделия, преступными потерями из-за непорядочности служащих и т.п.

2.5.2. Здоровье населения и экологический ущерб

Для оценки потери здоровья населением требуется выполнить оценку воздействия конкретного фактора, например, химического. Человек, чтобы оказаться в опасности, должен войти в контакт с химическим веществом, но мера опасности сильно зависит от того, сколько каждого вещества присутствует, кто и как подвергается воздействию. Оценка экспозиции химического вещества следует за оценкой его токсичности, для того чтобы определить какие заболевания или другие эффекты для здоровья могут быть вызваны данным воздействием. Необходимо также определить количества вещества, которые могут причинить вредные эффекты для здоровья (то есть, сколько каждого химического вещества необходимо, чтобы причинить вред). Вообще, чем выше доза, тем более вероятно, что вещество причинит вред. Этот вред необходимо сопоставить с уменьшением продолжительности или эквивалентом потери жизни.

Методология оценки риска химического воздействия включает следующие этапы [13]:

- идентификация опасности;
- оценка экспозиции;
- установление зависимости «доза-эффект»;
- характеристика и оценка риска;
- анализ факторов, влияющих на достоверность результатов;
- характеристика неопределенностей.

Риск неблагоприятного воздействия на окружающую среду

Основными источниками чрезвычайных ситуаций являются природные стихийные бедствия и техногенные аварии и катастрофы, в которые вовлекаются население, промышленные и гражданские объекты и природная среда. Для оценки риска необходима информация как по интенсивности аварийных ситуаций (вероятностям), так и по ущербу для окружающей среды. Наиболее важным реципиентом риска является человек. Вся система безопасности строится, прежде всего, в отношении человека. В этой связи при количественной оценке риска принимаются во внимание, по возможности, все основные виды ущерба, наносимого человеку, поддающиеся количественному определению. Однако неблагоприятному воздействию (в том числе со стороны человека) подвергаются и окружающая среда (включающая растительный и животный мир, составляющие экосистему). В некотором отношении оценка риска воздействия на объекты окружающей среды является более сложной и более неопределенной, чем оценка риска здоровью человека. В отношении объектов окружающей среды в зависимости от масштабов воздействия в процедурах оценки риска можно выделить три уровня: локальный, региональный и глобальный. По продолжительности воздействия – краткосрочные, среднесрочные и отдаленные воздействия. При этом определенные воздействия могут иметь необратимый характер, например, исчезновение отдельных биологических видов. Оценкам этих видов риска необходимо придавать особое значение. В состав необходимой для оценки риска информации должны быть включены данные по:

- состоянию воздушного бассейна и его загрязнению;

- характеристике ландшафта и его устойчивости к техногенным нагрузкам;
- состоянию и загрязненности поверхностных и грунтовых вод, содержанию в стоках вредных веществ;
- состоянию земельного фонда и его загрязненность вредными веществами;
- состоянию животного мира и растительности, их устойчивости к нагрузкам;
- фоновым для рассматриваемой территории уровням загрязнений.

Необходимо отметить, что любая оценка риска есть лишь некое приближение к «реальному» риску. Этому способствует значительное число неопределенностей: в результатах измерений концентраций вредных веществ в используемых моделях; в оценках токсичности и транспортных параметров и др.

Оценка экологического риска, в первую очередь, касается оценки влияния неблагоприятных эффектов факторов риска на популяции животных, растений или микробов и на структуры и функции экосистем. Методы оценки риска для популяций биологических видов аналогичны таковым для популяции человека. В этой связи представляют интерес изменения в смертности, физиологии или проявление отклонений и устойчивость к стрессовым воздействиям окружающей среды. Риски для определенной экосистемы включают такие факторы интереса как изменения разнообразия видов, их распространения, продуктивности и накопления биомассы; связи живых и неживых элементов экосистем, устойчивость к различного рода воздействиям и пр.

Методы для оценки потенциального воздействия факторов риска относятся к одной из четырех категорий [14]:

- тесты для одного биологического вида;
- тесты более чем для одного биологический вид;
- лабораторные тесты;
- тесты для полевых условий.

Оценка «воздействие-эффект» – наиболее сложная составляющая общей проблемы оценки риска экосистем. Так, активность образцов облученных ионизирующим излучением животных и орга-

низмов, а также метаболические/физиологические аспекты биологических видов, как правило, имеют большие вариации и менее изучены, чем для человека. Это делает определение (в особенности, поглощенной и эффективной дозы) и экстраполяцию «доза-эффект» более сложной для большинства процедур оценки экологического риска.

В соответствии с принципом экологического императива [15] для устойчивого развития социально-экономических систем экономика должна удовлетворять нужды и законные желания каждого человека и общества в целом в условиях повышения безопасности (увеличения продолжительности жизни и ее качества) при условии соответствия экологическим возможностям биосферы. Практическая реализация принципа возможна, только если используется система индикаторов состояния окружающей среды и сформированная на ее основе совокупность показателей, которые бы количественно на научной основе определяли состояние безопасности этой среды. Разработка таких показателей является важнейшей и сложнейшей проблемой. В настоящее время вопрос о разработке таких показателей находится только на стадии постановки. К ним на сегодняшний день можно отнести лишь степень «близости состояния экосистемы к границе ее устойчивости». Отметим, что и задача количественной оценки степени близости экосистем к границам их устойчивости является очень сложной. Тем не менее в некоторых странах такие оценки уже используются для введения в регламентирующую деятельность по безопасности количественных значений для предельно допустимых техногенных нагрузок (ПДНТ) на природную среду. Такие ПДНТ должны гарантировать отсутствие неустойчивости и непредсказуемости состояния экологических систем при соблюдении ограничений уровня техногенного воздействия. Так, согласно принятому в Нидерландах законодательству [16], уровень воздействия на экосистему (т.е. ПДТН) не должен превышать уровня, при котором могут пострадать 5 % видов в экосистеме.

Необходимые шаги на пути решения этой задачи – создание перечня индикаторов состояния окружающей среды (ОС) (табл. 2.12) [17]. При этом использованы разработки по этой проблеме, выполненные статистическим управлением ООН (СУ ООН) и организацией по экономическому развитию и сотрудничеству (ОЭСР). ОЭСР рассматривает индикаторы окружающей среды в контексте нагрузок на окружающую среду (движущие силы), ее состояние, ответной реакции, базовой информации; а СУ ООН – в контексте социально-экономических видов деятельности, воздействия и их последствий, ответной реакции на воздействия и базовой информации.

Таблица 2.12

Сводный перечень индикаторов состояния окружающей среды

Проблемные области	Нагрузки (ОЭСР). Социально-экономическая деятельность	Состояние ОС (ОЭСР). Воздействия (СУООН)	Ответная реакция ОС (ОЭСР). Ответная реакция на воздействия (СУООН)	Базовая информация (СУ ООН)
Атмосферный воздух/ климат	Выбросы CO_2, SO_2, NO_x. Потребление озоноразрушающих веществ	Концентрация CO_2, SO_2, NO_x, O_3 и взвешенных частиц	Никаких индикаторов предложено не было.	Погодные и климатические условия
Земли/ почва	Изменения в землепользовании, использование удобрений и с/х пестицидов	Площадь, подверженная почвенной эрозии	Природоохранные территории (% от всей площади земель)	Обрабатываемые земли на душу населения
Вода/ пресноводные ресурсы	Годовой забор грунтовых и поверхностных вод. Подушевое потребление воды для бытовых целей, промышленное и с/х водопользование	Концентрация свинца, кадмия, пестицидов в пресноводных водоемах, БПК и ХПК в пресноводных водоемах	Обработка сточных вод (% охваченного населения), доступность безопасной тепловой воды (% охваченного населения)	Резервы грунтовых вод
Ресурсы морской воды	Пока не предложено никаких индикаторов	Пока не предложено никаких индикаторов	Пока не предложено никаких индикаторов	

Продолжение табл. 2.12

Проблемные области	Нагрузки (ОЭСР). Социально-экономическая деятельность	Состояние ОС (ОЭСР). Воздействия (СУООН)	Ответная реакция ОС (ОЭСР). Ответная реакция на воздействия (СУООН)	Базовая информация (СУ ООН)
Биологические и другие природные ресурсы	Годовое производство кругляка, подушевое потребление топливной древесины, улов морских видов	Темпы обезлесения, вымирающие и находящиеся под угрозой вымирания биовиды	Темпы лесовосстановления, лесозащитные территории (% от всей территории)	Учет лесов
Минеральные, включая энергетические ресурсы	Извлечение минеральных ресурсов, годовое подушевое энергопотребление	Истощение минеральных ресурсов (% от выявленных ресурсов)	Пока не предложено никаких индикаторов	Выявленные минеральные ресурсы, выявленные энергоресурсы
Отходы	Объем бытовых отходов, объем импорта и экспорта опасных отходов	Пока не предложено никаких индикаторов	Пока не предложено никаких индикаторов	Пока не предложено никаких индикаторов
Поселения человека	Темпы роста городского населения, % городского населения, количество автомобилей на 1000 чел.	Площадь и население маргинальных поселений, % населения с санитарными услугами	Пока не предложено никаких индикаторов	Пока не предложено никаких индикаторов
Стихийные бедствия	Частота	Количество раненых и жертв	Пока не предложено никаких индикаторов	Пока не предложено никаких индикаторов

Большое внимание должно уделяться не только проблеме экологической безопасности природной среды, но и проблеме оценки биологических факторов опасности окружающей среды для самого человека. В этом вопросе также имеются объективные трудности. База данных «воздействие-эффект» весьма ограничена, кроме того, отсутствуют общепризнанные критерии, оценивающие биологические факторы опасности среды для человека. Используемая на практике система оценок, основанная на единственном типе нормативов – ПДК для отдельных токсических веществ является необходимой, но недостаточной. Для многих веществ в ПДК не заложена оценка их мутагенности, канцерогенности, иммунной и психотоксичности, эмбриотоксичности. Поэтому так важны исследования, направленные, с одной стороны, на разработку критериев, позволяющих оценить и предсказать весь комплекс биологических факторов опасности, а, с другой стороны, на разработку математических методов агрегирования разнородной информации и выработку интегрированного критерия оценки опасности.

Научно обоснованное принятие решений в области экологической безопасности (как и в любой другой) требует взвешенного анализа, основанного на оценках риска с учетом экономической эффективности этих решений.

2.6. ФОНОВЫЙ УРОВЕНЬ РИСКА

Важным моментом в вопросах риска является понятие фонового риска [18].

Существующий в данном районе уровень риска, связанный с возможностью гибели или получения травмы вследствие неестественных причин – несчастного случая, преступления или другого «неестественного события», определяется термином «фоновый риск». Если не оговорено особо, будем относить этот термин к категории антропогенного риска.

Можно выделить несколько уровней для рассмотрения и оценки фонового риска:

- мировой,
- национальный,

- региональный,
- местный.

В общем случае не существует какой-либо зависимости между значениями риска на этих уровнях.

Считается, что события, вероятность которых ниже уровня фонового риска, могут не рассматриваться с точки зрения их влияния на риск независимо от последствий таких событий.

При создании же потенциально опасных техногенных объектов допустимый уровень риска целесообразно (хотя, вероятно, это не всегда реально осуществимо) сравнивать с минимальным уровнем риска на всех уровнях. Это исключает случай, когда в регионе с повышенным фоновым уровнем риска обосновывается допустимость размещения объектов с уровнем риска ниже местного уровня, но значительно превышающего, например, национальный.

В литературе принято относить риск к одной из трех категорий: пренебрежимый, приемлемый, неприемлемый.

В западных странах приемлемым риском считается: $10^{-4} - 10^{-8}$ в год. В Нидерландах в 1985 году концепция приемлемого риска была принята в качестве закона. Вероятность смерти от опасностей, связанных с техносферой, считается недопустимой, если она превышает 10^{-6}. Приемлемой по этому закону считается вероятность менее 10^{-8}. В диапазоне $10^{-6} - 10^{-8}$ решение принимается исходя из экономических и социальных аспектов.

При оценке величины приемлемого индивидуального риска большинство западных авторов сходятся примерно на величине 10^{-6} в год. Риск выше 10^{-4} однозначно считается неприемлемым. В общем случае необходимо руководствоваться значениями риска в данном месте.

Индивидуальный риск может быть обусловлен различными причинами [19]. Это, прежде всего, генетические и соматические заболевания, а также старение, т.е. причины, связанные с источником риска смерти – внутренней средой организма. Источником риска смерти является также естественная среда обитания, различные процессы в которой могут приводить к эффектам разного масштаба. Человек в процессе своего развития создал особые условия существования, которые можно определить термином «искусственная среда обитания». В этой среде появились новые виды опасности, связанные с несчастными случаями на транспорте, в быту, а также с загрязнением окружающей среды. Кроме перечисленных, источниками риска смерти может являться профессиональная и непрофессиональная деятельность человека, а также социальная среда.

В табл. 2.13 приведена классификация источников риска смерти [19]. Приведенные источники риска смерти только в первом приближении можно считать действующими на человека независимо друг от друга. При более детальном анализе необходимо учитывать их взаимовлияние. Так события в естественной и искусственной средах обитания, конечно же, оказывают влияние на внутреннюю среду организма. Например, загрязнение окружающей среды негативно влияет на здоровье человека. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценках интегрального риска.

Таблица 2.13

Классификация источников риска смерти

№ п/п	Источники риска смерти	Основные причины смерти
1	Внутренняя среда обитания	Генетические и соматические заболевания, старение
2	Естественная среда обитания	Несчастные случаи при землетрясениях, ураганах, наводнениях и т.п.
3	Искусственная среда обитания	Несчастные случаи на транспорте, в быту, заболеваемость от загрязнения внешней среды и т.п.
4	Профессиональная деятельность	Профессиональные заболевания, несчастные случаи на производстве
5	Непрофессиональная деятельность	Заболеваемость и несчастные случаи в любительском спорте и других видах непрофессиональной деятельности
6	Социальная среда	Убийства и самоубийства, ранения и пр.

Простое суммирование приведенных составляющих будет давать фактически первое приближение к интегральной оценке риска. Для адекватной оценки риска можно вместо линейной модели использовать другие модели, например, мультипликативную. Однако любую модель, особенно более сложную, есть смысл разрабатывать, если ее можно обеспечить необходимыми данными.

В табл. 2.14 приведены обобщенные данные по средним значениям оценок риска смерти от воздействия различных источников опасности, включая естественную и искусственную среды, а также непрофессиональную и профессиональную деятельности и социальную среду [18].

Таблица 2.14

Сравнительная оценка антропогенного риска

Порядок вероятности гибели [ед./год]	Причина гибели
- 12	Смерч, ураган, торнадо
- 11	Гроза
- 10	Землетрясение, наводнение, цунами; укусы и уколы ядовитых животных и насекомых
- 9	Взрывы бытового газа в домах
- 8	Аварии на общественном и железнодорожном транспорте
- 7	Катастрофы самолетов гражданской авиации; несчастные случаи при катании на горных лыжах
- 6	Автомобильная авария (США); несчастные случаи при занятиях мотоспортом
- 5	Несчастные случаи с альпинистами; профессиональная деятельность полицейских, пожарных, летчиков-испытателей, боксеров
- 4	Спортивные автогонки, скачки с препятствиями, экипажи военных вертолетов

В табл. 2.15 для сравнения приведены обобщенные данные по фоновому риску для территорий в границах бывшего СССР [18].

Таблица 2.15

Сравнительные данные по фоновому уровню риска

Событие	Вероятность	
	Пострадать	Погибнуть
Гибель от неестественных причин населения г. Камбарка	-	1.5×10^{-2}
Смерть от неестественных причин (1987 г.)	-	1.1×10^{-3}
Гибель в происшествиях с подвижным составом (1988 г.)	-	1.6×10^{-4}
Убийство или самоубийство (1991 г.)	-	1.6×10^{-4}
Риск в дорожно-транспортных происшествиях в Московской обл. (1991 г.)	1.14×10^{-3}	2.68×10^{-4}
Риск гибели в результате умышленного убийства в Московской обл. (1991 г.)	-	7.0×10^{-5}
Верхняя оценка поражения персонала техногенных объектов	1.6×10^{-4}	1.9×10^{-5}
Верхняя оценка гибели населения в результате природного чрезвычайного события (1989 г.)	1.3×10^{-4}	1.2×10^{-6}
Верхняя оценка гибели населения в результате техногенного чрезвычайного события (1989 г.)	2.0×10^{-5}	2.4×10^{-6}

Анализ приведенных в табл. 2.15 данных показывает, что для территорий бывшего СССР фоновый уровень риска (смерть от неестественных причин) близок к 1×10^{-3}. Вероятность гибели от неестественных причин для населения г. Камбарка, в районе которого расположен объект по хранению отравляющих веществ, еще больше. Это на несколько порядков выше, чем принятый в западных

странах нормативный уровень. Однако ориентироваться на уровень 1×10^{-3} вряд ли следует. В то же время верхняя оценка гибели населения в результате техногенного чрезвычайного события составляет 2.4×10^{-6}. С учетом этих и других обстоятельств в работе [18] предлагается считать для территории России фоновым уровнем риска значение 5×10^{-6}. Границей же недопустимого риска предлагается считать 5×10^{-5}.

Интересный обзор изменения опасностей в течение дня был составлен сотрудником фирмы Imperial Chemical Industries. На рис. 2.9 приведена динамика изменения риска в течение дня. По оси ординат отложена частота событий с фатальным исходом [2].

Из анализа рисунка следует, что работа в химической промышленности, вопреки сложившемуся мнению, не намного опаснее, чем домашний туалет и принятие пищи и значительно менее опасна, чем забавы вроде езды на мотоцикле.

Рис. 2.9. Повседневные опасности

2.7. КОНЦЕПЦИЯ ПРИЕМЛЕМОГО РИСКА

Любой вид деятельности связан с определенной степенью вредного воздействия (риском). При этом должно быть обеспечено условие безопасности – т.е. условия приемлемого риска. В идеале приемлемый риск должен соответствовать условию равновесия между риском и пользой от этого вида деятельности.

На основании критического анализа существующих подходов для обоснования критериев обеспечения безопасности человека отмечается [19]:

- вероятностный характер потенциальных источников опасности;
- индивидуальная вариабельность последствий воздействий различных техногенных факторов;
- беспороговый характер стохастических проявлений воздействия неблагоприятных техногенных факторов;
- комбинированное воздействие различных техногенных факторов;
- ограниченность доступных ресурсов для обеспечения безопасности.

При этом основные принципы концепции приемлемого риска можно сформулировать в виде положений [19]:

1. Принимается мера опасности – риск.
2. Утверждается, что любому уровню воздействия соответствует некоторый уровень риска.
3. Признается наличие опасных сочетаний источников воздействия.
4. Предполагается существование некоторого уровня приемлемого риска.
5. Считается, что уровень приемлемого риска можно установить с учетом экономических, социальных и других условий.
6. Постулируется, что уровни приемлемого риска стихийно формируются в обществе и проявляются в масштабах риска.

7. Постулируется, что уровнем приемлемого риска можно управлять, воздействуя на условия его формирования.

8. Предполагается использование концепции замещения «старых» рисков «новыми» при условии снижения общего уровня достигнутого риска.

Проблема определения приемлемого риска имеет социальные, экономические, психологические и другие аспекты.

Социальные проявляются в различиях пользы и вреда от конкретного вида деятельности для различных социальных групп.

Психологические проблемы очень сложны и недостаточно изучены. Каждый человек имеет свою шкалу оценки риска.

Экономические аспекты можно выявить как при рассмотрении затрат, связанных со снижением риска, так и при анализе потерь из-за недостаточно низкого уровня риска.

Выражая затраты и потери в одинаковых единицах, что само по себе представляет непростую задачу, и суммируя их, можно оценить экономическую целесообразность защитных мер. В этом случае, в принципе, возможно отыскать минимум суммы потерь и затрат, соответствующий оптимальным условиям реализации мер.

Уровень риска, обеспечивающий минимум суммы потерь и затрат, можно условно назвать *приемлемым*.

Однако на практике затраты и потери зачастую выражаются в разных единицах (представлены в разных шкалах), поэтому сведение их к единой шкале представляет собой нетривиальную задачу и не всегда возможно.

Кроме того, точный вид зависимости затрат и потерь от уровня риска в большинстве случаев неизвестен, поэтому отыскание минимума суммы потерь и затрат затруднительно.

Условия минимума и, соответственно, уровня приемлемого риска можно найти, анализируя масштабы риска в жизни человека. Это мнение основывается на признании стихийно реализуемых в обществе тенденций установления приемлемого равновесия между пользой и затратами для различных видов деятельности. Общество движется в направлении такого равновесия эмпирическим путем, путем проб и ошибок.

Необходимо отметить, что говоря о приемлемом риске, мы, как правило, имеем в виду диапазон, а не число, соответствующее некоему минимуму.

2.8. ПРОЦЕДУРА ALARA

В 1990 году Международная Комиссия по радиологической защите (МКРЗ) [20] выпустила рекомендации, в которых были определены три фундаментальных принципа, лежащие в основе современной системы радиационной защиты:

- никакая практическая деятельность, связанная с облучением, не должна приниматься, если польза от нее для облученных лиц или общества в целом не превышает ущерба от вызванного ею облучения;

- для любого отдельного источника в рамках данной практической деятельности значения индивидуальных доз, число облученных лиц и возможность подвергнуться облучениям, которые необязательно случатся, должны поддерживаться на столь низких уровнях, какие только могут быть разумно достигнуты с учетом экономических и социальных факторов;

- облучение отдельных лиц от сочетания всех соответствующих видов практической деятельности должно ограничиваться пределами дозы или контролем риска в случае потенциального облучения.

Эти три принципа, обычно называемые «обоснование, оптимизация и нормирование», представляют собой кульминационный момент перехода от ограничения индивидуальных доз к снижению доз до оптимального уровня. Концепция оптимизации уровней облучения или ALARA (сокращение "As Low As Reasonably Achievable" – "настолько низко, насколько разумно достижимо") стала основным принципом в современной радиационной защите. Однако вследствие качественной природы концепции, которая предлагает учитывать "экономические и социальные факторы", возникла необходимость выработать ясные и недвусмысленные правила для ее интерпретации.

Ниже приведены основные положения концепции [21].

Принятие решений есть часть повседневной жизни

Каждый день нам приходится принимать множество решений. Зачастую мы даже не задумываемся об этом. Что одеть? Взять ли с собой зонт? Где и как переходить дорогу? Каждый раз мы стараемся поступить оптимальным образом. Часто процесс принятия решений происходит на подсознательном уровне. В случае, когда мы имеем дело со сложными ситуациями, может потребоваться осознанная оценка доводов «за» и «против» различных вариантов решений. Например, при покупке автомобиля могут приниматься во внимание различные факторы: безопасность, надежность, цена, цвет, различные технические характеристики. При этом мы имеем дело с многокритериальным выбором. Процедура взвешивания достоинств и недостатков конкретного решения и определение лучшего известна как оптимизация. В основе оптимизации лежит здравый смысл. Здесь мы сфокусируем внимание на оптимизации радиационной защиты.

Оптимизация радиационной защиты часто называется принципом "ALARA". Таким образом, по сути:

ALARA = ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ.

Концепции, положенные в основу принципа ALARA

В начальные годы становления радиационной защиты бытовало мнение о том, что если индивидуальная доза не превысит определенного порогового уровня, то вреда здоровью человека не будет. Это мнение основывалось на наблюдениях нестохастических, или детерминированных эффектов при достаточно больших дозах рентгеновского излучения или излучения радиоактивных нуклидов, которые вызывали определенные повреждения тканей человека, в то время как при низких дозах таких эффектов не наблюдалось. Исходя из этого, ранние системы радиационной защиты были направлены на поддержание индивидуальных доз ниже предельных, которые определялись в соответствии с пороговыми значениями для этих эффектов.

Позже выяснилось, что существуют и другие последствия для здоровья от радиационного облучения: соматические (возникающие непосредственно у облученного человека) и генетические (у его потомства), для которых, по-видимому, не существует наблюдаемого дозового порога. Эти эффекты называются стохастическими или вероятностными. Причем, увеличение дозы радиации ведет к росту вероятности возникновения этих эффектов. Также считается, что эта зависимость справедлива вплоть до нулевых значений доз, т.е. даже при очень низких уровнях облучения существует ненулевая вероятность ущерба для здоровья. Причем, связь между дозой и вероятностью возникновения вредных для здоровья эффектов описывается линейной зависимостью «доза-эффект».

Признание того, что не существует безопасного уровня радиационного облучения, привело к мысли о необходимости его уменьшения насколько это возможно. Однако радиационная защита, как и многие другие практические задачи, подчиняется "закону убывающей эффективности". В данном случае закон гласит: первоначальные затраты на защиту могут привести к значительному снижению доз, однако последующие затраты дают все меньший и меньший эффект. Аналогом может служить ситуация с установкой дополнительных оконных рам в доме. Установка двойной рамы вместо одиночной дает заметный выигрыш в теплоизоляции, установка тройной рамы даст значительно меньший эффект, а четверной - еще меньший. «Закон убывающей эффективности» в радиационной защите проиллюстрирован на рис. 2.10.

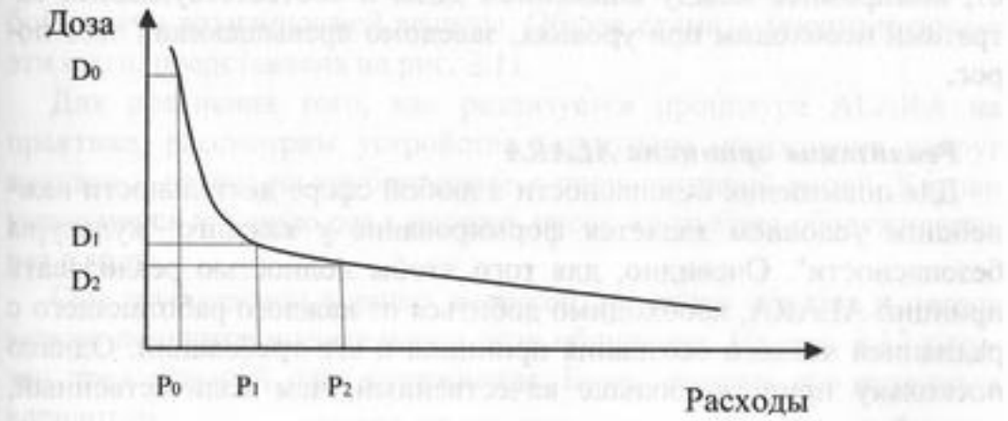


Рис. 2.10. Закон убывающей эффективности

В соответствии с рис. 2.10 увеличение расходов с P_0 до P_1 приводит к уменьшению дозы облучения с D_0 до D_1, однако эквивалентное увеличение расходов с P_1 до P_2 приводит к существенно меньшему уменьшению дозы облучения с D_1 до D_2.

В силу ограниченности ресурсов, выделяемых на радиационную защиту, закономерен вопрос, насколько далеко нужно идти в снижении доз. Решение следует искать на основе некоторого компромисса между снижением дозы и стоимостью защитных мероприятий, которые могут быть приняты. Другими словами, необходима оптимизация радиационной защиты.

Таким образом, две основные предпосылки: отсутствие наблюдаемой пороговой дозы и ограниченность доступных для защиты ресурсов, являются мотивом для разработки принципа ALARA.

Данный принцип содержит два момента. Во-первых, он констатирует, что не следует минимизировать дозы любой ценой, поскольку при уже достигнутом оптимальном уровне защиты и при дозах, не превышающих допустимых пределов, нет смысла продолжать тратить ресурсы для дальнейшего снижения дозы. Они могут быть использованы с большей пользой по-другому.

Во-вторых, как уже упоминалось, подход ALARA основан на отсутствии наблюдаемой пороговой дозы для стохастических эффектов. Однако даже в предположении, что такой порог существует, компромисс между снижением дозы и соответствующими затратами необходим при уровнях, заведомо превышающих этот порог.

Реализация принципа ALARA

Для повышения безопасности в любой сфере деятельности важнейшим условием является формирование у каждого "культуры безопасности". Очевидно, для того чтобы полностью реализовать принцип ALARA, необходимо добиться от каждого работающего с радиацией четкого осознания принципа и его требований. Однако поскольку принцип больше качественный, чем количественный, каждый может интерпретировать его по-своему.

Одним из ключевых моментов, требующих своего пояснения, является ответ на вопрос, как много усилий необходимо прило-

жить, чтобы уменьшить облучение, так как априори нет однозначной связи между дозой и связанным с ней ущербом здоровью.

Зачастую решение по радиационной защите может быть принято подсознательно, но всегда полезно применять последовательный системный подход. Этот системный подход называется процедурой ALARA. Одной из основных ее функций является структурирование и стандартизация оценок различных людей, применяющих процедуру, или одного человека, сравнивающего разные ситуации. Таким образом, процедура должна помочь в получении согласованных и последовательных решений.

Существуют различные методы, которые могут применяться в рамках процедуры ALARA. Нет необходимости в применении этих методов во всех случаях, да и сами эти методы полностью независимы от процедуры ALARA. Одним из этих методов является анализ «затраты - выгода», который обычно отождествляется с ALARA.

Важно понять, что процедура ALARA является полезной при выработке решений. Сама по себе она не принимает решения. Принятие решений – прерогатива лица принимающего решения (ЛПР).

Процедура ALARA – обзор

Как было сказано выше, процедура ALARA – это простой перечень шагов, который определяет структуру подхода и решения любой задачи радиационной защиты. Общая схема, иллюстрирующая эти шаги, представлена на рис. 2.11.

Для пояснения того, как реализуется процедура ALARA на практике, рассмотрим устройство защитного ограждения вокруг клапана и насоса на трубопроводе с радиоактивной водой. Клапан управляется вручную раз в неделю, насос же требует обслуживания раз в году.

Сам трубопровод хорошо защищен, но около клапана и насоса можно получить значительную дозу облучения. На рис. 2.12 показан предлагаемый план ограждения. Будем считать его исходным вариантом.

Актуален вопрос – являются ли дозы столь малыми, насколько возможно разумно достичь с учетом экономических и социальных

факторов. Задача, которую нужно решить: должны ли быть модифицированы план и порядок работы для достижения лучшего уровня защиты при данных условиях.

Для ответа на этот вопрос необходимо рассмотреть возможные варианты; собрать информацию о каждом варианте, а также установить критерии отбора.

Можно провести этот анализ на основе взвешивания «за» и «против», но лучше применить процедуру ALARA.

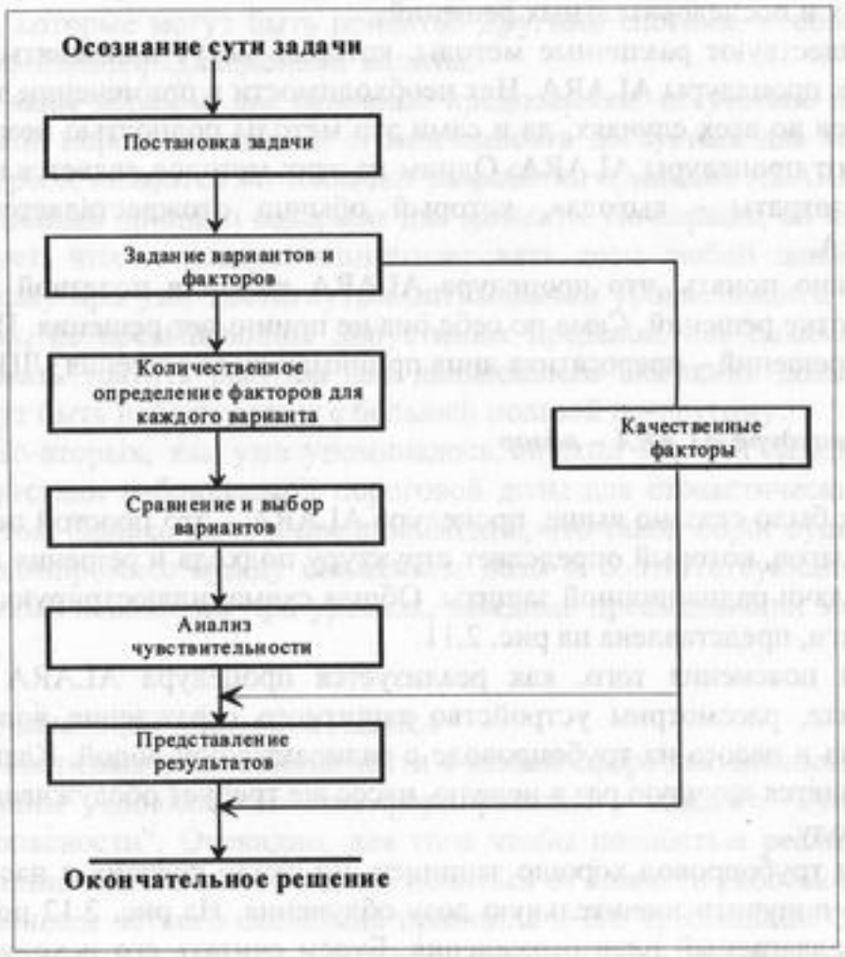


Рис 2.11. Последовательность шагов процедуры ALARA

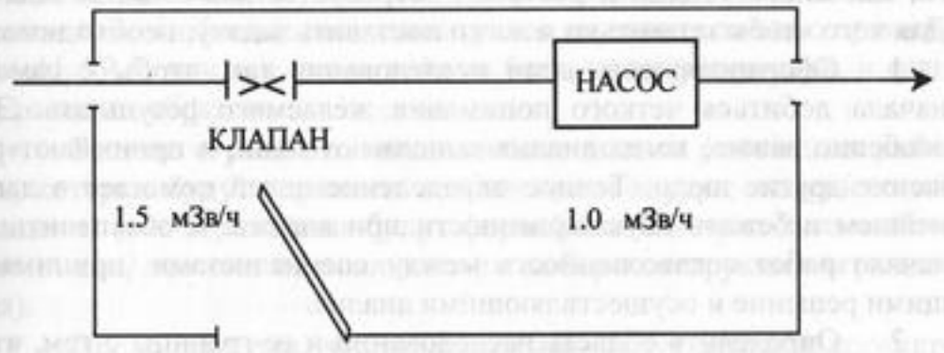


Рис. 2.12. Устройство защитного ограждения вокруг трубопровода с радиоактивной водой (Вариант А)

Осознание проблемы

Перед применением процедуры ALARA первым шагом в принятии решения является ясное осознание сути задачи. Например, является ли проблема сложной или относительно простой? Как много усилий (времени и средств) потребуется? Будет ли специалист, который анализирует проблему, принимать также и решение? Относится ли искомое решение к задаче низкого уровня (например, решение принимается исполнителями, и относится к частной задаче, такой как выбор оборудования) или высокого уровня (например, решение принимается руководящим составом или правительственными чиновниками и относится к более масштабным проблемам, например, к выбору технологии)?

После осознания задачи, может получиться так, что ее решение окажется настолько очевидным для опытного специалиста в области радиационной безопасности, что структурный подход процедуры ALARA не потребуется. Однако если решение не является очевидным или если специалисту, принимающему решение, понадобится обосновать его, процедура ALARA должна выполняться.

Процедура ALARA

Постановка задачи

Этот первый шаг процедуры ALARA непосредственно следует за осознанием проблемы и является решающим в определении то-

го, как много усилий и ресурсов потребуется для анализа задачи. Для того чтобы правильно и легко поставить задачу, необходимо:

1. Сформулировать цели исследования так, чтобы с самого начала добиться четкого понимания желаемого результата. Это особенно важно, когда анализ выполняют одни, а принимают решение другие люди. Точное определение целей помогает в дальнейшем избежать двусмысленности при анализе и обеспечить до начала работ согласованность между специалистами, принимающими решение и осуществляющими анализ.

2. Определить область исследований и ее границы с тем, чтобы знать, когда необходимо остановиться. Например, является ли необходимым рассмотрение дозовых нагрузок на людей, косвенно подвергаемых радиационному облучению от оборудования? Есть ли ограничения на финансовые ресурсы, которые могут быть использованы для решения этой задачи? Какие уровни точности и детализации необходимы при проведении анализа?

3. Консультации. Поставив задачу, специалист по анализу для проверки правильности постановки задачи, должен проконсультироваться со специалистом, принимающим решение, или, если необходимо, с руководителем более высокого ранга. Если постановка задачи будет признана правильной, то специалист по анализу может приступать к работе. В противном случае исходные положения должны быть пересмотрены.

Для большинства задач, кроме самых простых, целесообразно записать постановку задачи на бумаге, чтобы сконцентрировать внимание, и во время анализа не тратить напрасно усилий на решение вопросов, не существенных для данной задачи.

Для нашего примера "клапан-насос", опираясь на вышеприведенные подпункты (1), (2) и (3), можно сформулировать задачу следующим образом:

- Задача “клапан-насос” является сравнительно простой; решение, скорее всего, будет приниматься тем же специалистом, который выполнял анализ, на относительно низком уровне; из самой задачи следует, что она не займет много времени или усилий на детальную проработку.

- Предполагается, что схема рис. 2.12 реализована; задача состоит в том, чтобы оценить, согласуется ли данная схема с принципом ALARA, или эта схема должна быть модифицирована, и если да, то каким образом.
- Решено ограничить исследование дозами ремонтных рабочих, которые будут управлять механизмами внутри защитного ограждения (вне ограждения будут формироваться настолько низкие уровни доз, что они не повлияют на выбор конструкции ограждения).
- Предполагается, что приемлемыми будут затраты, соответствующие верхней границе диапазона, определенного государственными организациями для стоимости чел.·Зв.
- Для этой задачи высокий уровень точности не нужен.
- Нет необходимости консультироваться и согласовывать постановку задачи с кем-либо еще.

Задание вариантов и факторов

Следующая стадия процедуры – задание вариантов и факторов. Варианты представляют собой альтернативные действия, являющиеся возможными решениями задачи. Фактор задается как определенная мера или качество, с помощью которого различаются варианты.

Любая задача радиационной защиты должна учитывать дозы облучения (эффективную дозу) и поэтому для определения возможных вариантов полезна простейшая запись уравнения для коллективной дозы

$$S = \dot{H} \cdot t \cdot N, \qquad (2.9)$$

где S – коллективная доза, $\dot{H}$ – средняя мощность дозы, t – время работы, N – число рабочих.

Варианты защиты будут получены изменением одного или нескольких (из трех) компонент уравнения.

Варианты, уменьшающие мощность дозы, включают дополнительную защиту и изменение типа источника.

Время, необходимое на выполнение поставленных задач и количество исполнителей характеризуют общий объем работ. Он может быть уменьшен путем простой реорганизации; можно сократить время выполнения работ путем предварительного обучения персонала на рабочих макетах или, возможно, применяя специальные инструменты или роботы.

В нашем случае мы будем считать, что число рабочих и длительность технологических операций уже оптимизированы. Остается понять, что может быть сделано для снижения мощности дозы путем модификации схемы ограждения.

После консультации с разработчиками специалист по анализу получает две другие возможные схемы защитного ограждения. Они показаны на рис. 2.13 и 2.14.

Возможные варианты:

(А) Не предпринимать вообще никаких действий и оставить существующую схему, показанную на рис.2.12. (Этот вариант часто называется "базовым случаем", "нулевым уровнем защиты" или "вариантом нулевой защиты".)

(Б) Поставить свинцовую перегородку так, как показано на рис.2.13. Теперь рабочий, управляющий клапаном, защищен некоторым образом от насоса и, аналогично, рабочий, обслуживающий насос, лучше защищен от клапана.

(В) Поставить разделяющую стену между клапаном и насосом, получая две отдельные комнаты, каждую со своей входной дверью, как показано на рис.2.14. Мощность дозы в обеих комнатах становится теперь еще ниже.

Определив варианты, обратим внимание на факторы. В большинстве задач радиационной защиты факторы принадлежат одной из двух основных групп:

Дозы	Расходы
- Коллективные дозы	- Инвестиции
- Распределение индивидуальных доз	- Эксплуатация и ремонт
- Распределение мощности дозы во времени	- Распределение затрат во времени
- Соотношение общественных и профессиональных интересов	- Взаимозависимость затрат

Для более сложных задач могут учитываться и другие факторы. Существуют решения очень высокого политического статуса (например: выбор площадок для размещения радиоактивных отходов), где должны приниматься во внимание социальные факторы, в частности, общественное мнение и экологические факторы.

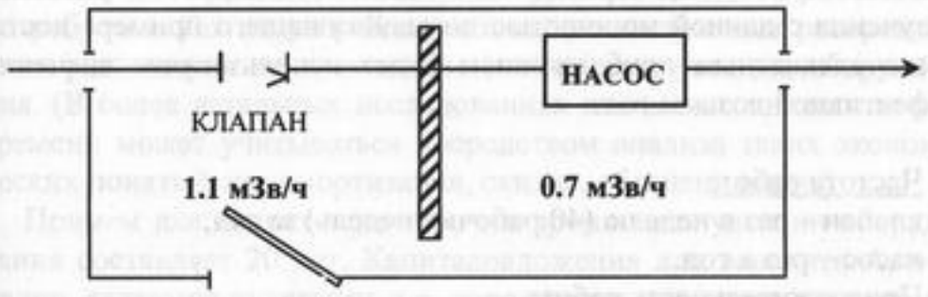


Рис. 2.13. Возможная схема ограждения (Вариант Б)

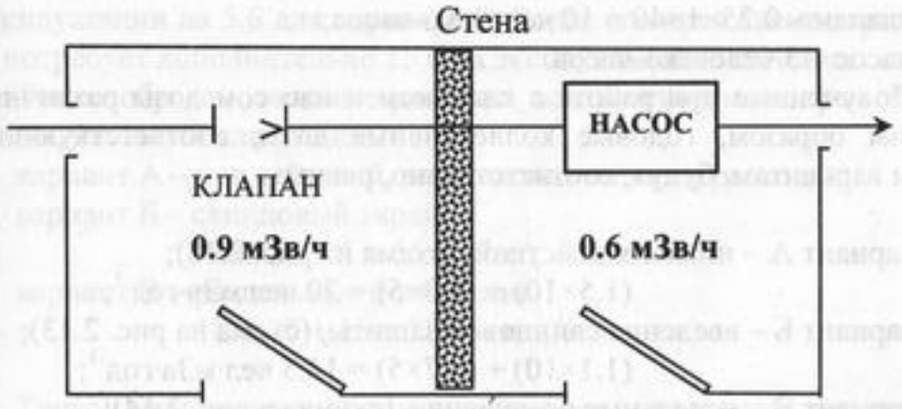


Рис. 2.14. Возможная схема ограждения (Вариант В)

Количественное определение факторов для вариантов

Приступим к количественному заданию факторов. Как правило, это наиболее трудоемкая часть анализа, но для данного примера это сделать не сложно.

Дозы

Коллективная доза определяется мощностью дозы и количеством человеко-часов, затраченных на выполнение работ в условиях облучения с данной мощностью дозы. Для нашего примера достаточно адекватным приближением будет использование значений эффективной дозы за год.

Частота работ:
клапан – раз в неделю (40 рабочих недель) за год;
насос – раз в год.
Продолжительность работ:
клапан – 15 минут (0.25 часа),
насос – 5 часов.

Следовательно, время, проведенное за выполнением каждой из этих работ за год:
клапан – 0,25×1×40 = 10 человеко-часов;
насос – 5 человеко-часов.

Полученные при работе с клапаном и насосом дозы различны. Таким образом, годовые коллективные дозы, соответствующие трем вариантам, будут, соответственно, равны:

вариант А – никаких действий, (схема на рис. 2.12);
$$(1.5\times10) + (1.0\times5) = 20 \text{ чел·мЗв·год}^{-1};$$
вариант Б – введение свинцовой защиты, (схема на рис. 2.13);
$$(1.1\times10) + (0.7\times5) = 14.5 \text{ чел·мЗв·год}^{-1};$$
вариант В – отдельные помещения, (схема на рис. 2.14);
$$(0.9\times10) + (0.6\times5) = 12 \text{ чел·мЗв·год}^{-1}.$$

Таким образом, снижение годовой коллективной дозы на 5.5 чел·мЗв·год$^{-1}$ достигается при переходе от варианта А к варианту Б. Дальнейшее снижение на 2.5 чел·мЗв·год$^{-1}$ достигается при переходе от варианта Б к варианту В.

Расходы

Для цели сравнения расходы должны быть определены для того же промежутка времени, что и дозы, т.е. за год. Расходы в этом случае должны учитывать начальные капиталовложения, время эксплуатации оборудования и годовые расходы на его ремонт и обслуживание.

Выше было решено, что высокий уровень точности расчетов не потребуется. Поэтому примем, что капиталовложения распределяются равномерно по времени в течение эксплуатации оборудования. (В более детальных исследованиях изменение индекса цен во времени может учитываться посредством анализа таких экономических понятий, как амортизация, скидка, обесценивание.)

Примем для нашего примера, что время эксплуатации оборудования составляет 20 лет. Капиталовложения для варианта А, очевидно, являются нулевыми, т.е. дополнительных расходов на защиту не будет. Стоимость введения свинцового экрана в варианте Б – 1200 € (Евро – Европейская денежная единица). Стоимость добавления двери и стенки для создания двух помещений составляет 4100 €.

Введение свинцового экрана увеличивает годовую стоимость эксплуатации на 5 € для варианта Б. Более сложная схема варианта В потребует дополнительно 15 € на эксплуатацию ежегодно.

Таким образом, годовые расходы, соответствующие трем вариантам, являются следующими:
вариант А – нет действий, нет дополнительных расходов;
вариант Б – свинцовый экран
$$1200/20 + 5 = 65 \text{ €. год}^{-1};$$
вариант В – раздельные помещения
$$4100/20 + 15 = 220 \text{ €. год}^{-1}.$$

Теперь необходимо ответить на вопрос, что лучше: ничего не делать и мириться с годовой коллективной дозой в 20 чел·мЗв·год$^{-1}$ или тратить 65 € год$^{-1}$ для снижения дозы на 5.5 чел·мЗв·год$^{-1}$ (что эквивалентно затратам 11.8 € для снижения дозы на 1 чел·мЗв) или потратить еще 155 € год$^{-1}$ для дальнейшего снижения доз на 2.5 чел·мЗв·год$^{-1}$ (что эквивалентно дальнейшим затратам 62 € на со-

кращение дозы в 1 чел·мЗв). Ответ зависит от того, сколько средств может быть затрачено, чтобы снизить коллективную дозу на 1 чел·мЗв. Именно здесь необходимо руководство, рекомендующее величину денежного эквивалента снижения единицы коллективной дозы.

Для принятия решений в радиационной защите существует стандартное значение, известное многим как параметр α – стоимость чел·мЗв или денежный эквивалент единицы коллективной дозы. Его значение либо рекомендовано государственными организациями, ответственными за радиационную защиту в стране, либо устанавливается внутри организаций. Существуют различные методы, помогающие оценить такое стандартное значение. В этом примере термин "параметр α" используется как синоним значения "величина чел·Зв"; однако параметр α имеет более специфическое определение, которое здесь не обсуждается.

Для целей наглядности в нашем примере мы будем использовать стандартное значение денежного эквивалента коллективной дозы в 30000 € на 1 чел·Зв, т.е. в 30 € на чел·мЗв.

Сравнение и выбор вариантов

Решения многих задач радиационной защиты могут быть получены путем простых рассуждений и здравого смысла, основанных на опыте. Однако для некоторых задач нужен более тщательный подход, и они могут потребовать письменного анализа. Для этого существуют методы поддержки принятия решений. Независимо от того, использовались ли эти методы или нет, специалисту по принятию решения важно записать задачу на бумагу для того, чтобы прояснить для самого себя процесс осмысления задачи, или чтобы обосновать другому человеку принятие данного решения.

Методы поддержки принятия решений включают в себя три наиболее широко известных:

- анализ «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА»;
- дифференциальный анализ «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА»;
- многофакторный анализ эффективности.

Анализ «ЗАТРАТЫ – ВЫГОДА»

Методика анализа «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА» основывается на уравнении, которое определяет лучшее или оптимальное решение как вариант, минимизирующий общую стоимость, т.е. итог финансовых расходов и расходов, связанных с причинением ущерба здоровью. Он также называется методом итоговой стоимости для анализа «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА».

Стоимость ущерба здоровью есть произведение денежного эквивалента единицы коллективной дозы (α) на коллективную дозу.

Таблица 2.16

База данных для анализа «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА»

Вариант	Стоимость X (€)	Доза S (чел × мЗв)	Итог $X+\alpha \cdot S$ (*) (€)
А	-	20	600
Б	65	14.5	**500**
В	220	12	580

(*) – значение единицы коллективной дозы (α) составляет 30 € (чел·мЗв)$^{-1}$.

Из табл. 2.16 следует, что оптимальным вариантом является вариант Б, имеющий самую низкую итоговую стоимость.

На рис. 2.15 эти же результаты представлены графически: приведен графики зависимостей стоимости *X*, стоимости дозы $\alpha \cdot S$ и график их суммы. Как следует из графиков, оптимальным является вариант Б, соответствующий минимуму.

Дифференциальный анализ «ЗАТРАТЫ-ВЫГОДА»

Альтернативным методом работы с данными является дифференциальный анализ «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА». Этот метод заключается в анализе различий между соседними вариантами. Для этого данные должны быть ранжированы по возрастанию расходов. В таблице 2.17 приведены данные, относящиеся к нашему примеру.

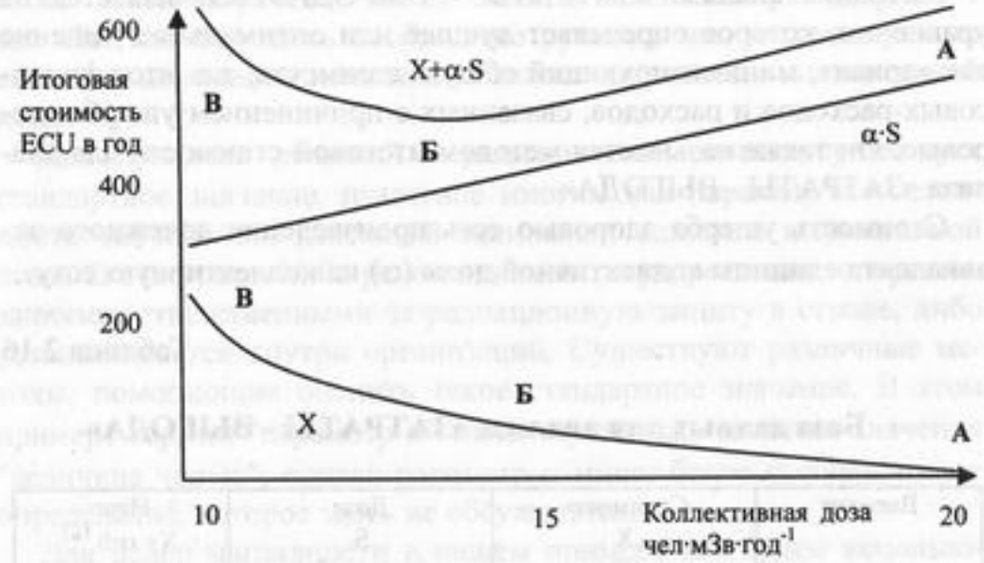


Рис. 2.15. График анализа «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА».

Таблица 2.17

Данные для дифференциального анализа «затраты - выгода»

Вариант	Стоимость X (€)	Доза S (чел·мЗв)	Прирост стоимости ΔX (€)	Снижение дозы ΔS (чел·мЗв)	$\Delta X/\Delta S$ €×(чел·мЗв)$^{-1}$
А	-	20	-	-	-
Б	65	14.5	65	5.5	11.8
В	200	12	155	2.5	62.0

Оптимальным вариантом следует считать вариант с минимальным отношением $\Delta X/\Delta S$. В нашем случае это вариант Б, т.е. тот же что и в предыдущем случае. Таким образом, полученное нами решение не зависит от используемого метода поддержки принятия решений.

Анализ чувствительности

Анализ чувствительности – это системный способ ответа на вопрос "Что будет, если..." для того, чтобы проверить устойчивость решения для настоящего времени и обозримого будущего. Повлияют ли изменения внешних условий, которые можно ожидать в реальной жизни, на выбор решения? Будут ли неопределенности данных (т.е. диапазон значений, внутрь которого, вероятно, попадает реальное значение) достаточно большими, чтобы получить другое оптимальное решение?

Анализ чувствительности может быть применим к следующим аспектам процедуры ALARA:

- перечню факторов и/или вариантов, включенных в процедуру;
- базе данных (например, расходы, дозиметрия, число людей и т.д.);
- неопределенностям в базе данных;
- используемым моделям (например, моделирование дозы, процедуры дисконтирования);
- значениям оценочных факторов (например, значение α, другие весовые коэффициенты).

Этот шаг может выполняться в самом начале процедуры ALARA качественно (даже если остальная часть анализа включает количественную оценку) или количественно, используя один из имеющихся методов.

Существует несколько специальных методов для выполнения сложного или расширенного анализа чувствительности, таких как метод Монте – Карло и метод гистограмм. Но для решения задач, с которыми обычно приходится иметь дело, они применяются редко.

Простейший способ анализа чувствительности заключается в изменении значения одного из параметров (при остальных фиксированных) для оценки его влияние на результаты.

Например, в нашей задаче "клапан-насос" можно было бы оценить влияние изменения расходов на годовую эксплуатацию или нормативной стоимости чел·Зв.

Для ускорения проведения анализа удобно пользоваться компьютерными программами. Написание таких программ имеет смысл для сложных задач. Графики и рисунки также могут быть полезны для иллюстрации влияния, которое параметры оказывают на результаты анализа. Например, на рис.2.16 изображен график влияния изменения значения параметра α на итоговую стоимость.

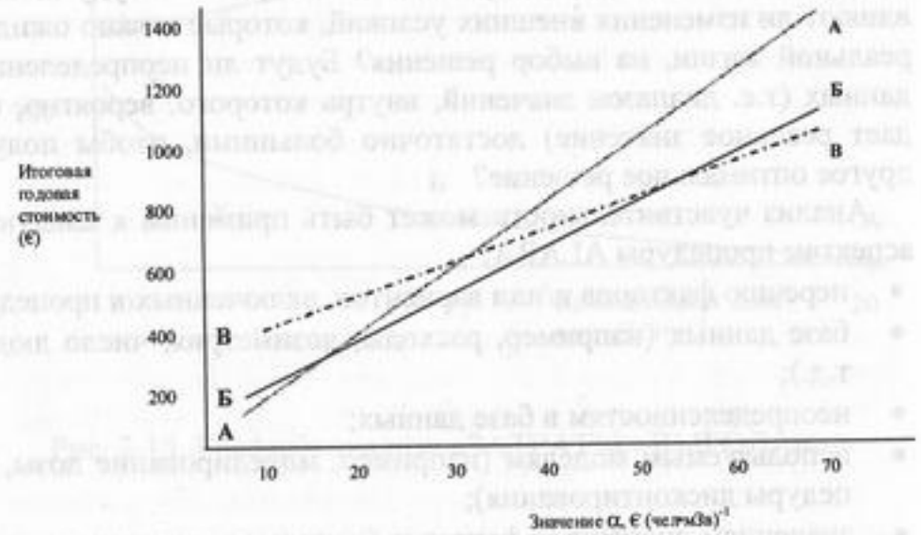


Рис. 2.16. Влияние значения α на итоговую стоимость

Оптимальным решением при анализе «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА» является решение с наименьшей итоговой стоимостью (с учетом финансовых и радиологических факторов), поэтому самая нижняя кривая на графике представляет собой оптимальное решение. При значении α ниже 11 €·(чел·мЗв)$^{-1}$ оптимальным становится вариант А, а при значении α превышающих 63 €·(чел·мЗв)$^{-1}$ оптимальным становится вариант В.

Представление результатов

В зависимости от природы и сложности задачи процедура ALARA может занять от нескольких минут до нескольких дней; может выполняться интуитивно одним лицом, либо составлять много страниц вычислений и текста. Кроме наиболее простых задач, когда решения принимаются экспертами подсознательно, анализ и результаты должны фиксироваться на бумаге. Результаты должны представлялись так, чтобы их легко можно было понять, особенно когда процессы анализа и принятия решения осуществляются разными лицами.

Усилия и ресурсы, затрачиваемые на представление результатов, должны согласовываться с:

- характером задачи,
- целями исследования,
- областью исследования и существующими ограничениями

и должны определяться заранее. Для нашего примера, где рассматривались годовые расходы порядка 200 €, не имеет смысла писать расширенный отчет. Страницы текста будет вполне достаточно.

При представлении анализа и результатов необходимо:

- составить перечень предположений и гипотез с разъяснениями к ним;
- если невозможно обосновать все причины и соображения, которые ведут к полученному результату, решить, какие из них будут полностью обоснованы, а какие будут только кратко упомянуты;
- прокомментировать факторы, которые были рассмотрены, но остались вне зоны анализа; так, например, в нашем случае не рассматривались индивидуальные дозы, поскольку предполагалось, что коллективная доза обеспечивает в достаточной степени учет нанесенного ущерба;
- прокомментировать все используемые субъективные весовые коэффициенты, такие как денежный эквивалент единицы коллективной дозы;
- прокомментировать все математические модели и методы поддержки принятия решения, используемые в анализе;
- представить результаты анализа чувствительности. Для наглядности результаты могут быть представлены графически;
- указать, с чем связана наибольшая неопределенность и могут ли повторные оценки улучшить анализ.

Представление результатов является заключительным шагом процедуры ALARA.

Решение

Применение процедуры ALARA приводит к получению оптимального результата, обычно с различными оговорками. Однако этот результат ALARA не является автоматически "конечным решением", он может рассматриваться только как рекомендация, помогающая ответственному лицу принять действительно оптимальное решение. Окончательная ответственность за его принятие остается за ним.

Если решение принимают и выполняют анализ разные специалисты, как часто бывает в случае сложных задач, важно, чтобы специалист, принимающий решение, четко представлял этапы прохождения процедуры ALARA. Поэтапное отслеживание процедуры поможет ему определить и понять факторы, связанные с разными вариантами, включая те, которые не были заданы численно и поэтому не включены в количественный анализ. Четкое понимание того, как был сформирован результат ALARA, должно помочь ему принять окончательное решение.

Для более сложных исследований специалист, принимающий решение, несомненно, пожелает рассмотреть адекватность данных, используемых в анализе и оценить, нужны ли дополнительные исследования для снижения неопределенности некоторых параметров, или количественного учета некоторых факторов, которые были рассмотрены только качественно. В этих случаях он останавливается на одном из двух вариантов: либо принять решение сейчас и мириться с последствиями, либо потратить больше времени и ресурсов, чтобы улучшить достоверность, прежде чем принять окончательное решение. Например, в случае задачи "клапан-насос" не было сложных исследований, и так как разница в итоговой стоимости между различными вариантами составляла только несколько десятков € за год, дальнейшее детальное исследование для улучшения анализа не оправдано. Однако ввиду сравнительно низкой разницы в финансовой стоимости между вариантами Б и В (только 155 €) специалист может решить выбрать более дорогой вариант.

Таким образом, окончательное решение всегда остается прерогативой специалиста, ответственного за его принятие.

Резюме

- Процедура ALARA является простым перечнем этапов анализа, обеспечивающим структуризацию подхода к любой задаче или решению в радиационной защите. Таким образом, основная цель процедуры – оградить эксперта от принятия поспешных решений.
- Процедура ALARA помогает стандартизировать процесс принятия решения как одним лицом, так и группой лиц, обеспечивая определенную последовательность в принятии решения.
- Точное следование процедуре ALARA дает уверенность, что никакие важные факторы не были пропущены и все возможные варианты были рассмотрены.
- В основе структуризации, предлагаемой процедурой ALARA, по существу, лежит просто здравый смысл. Процедура не заключает в себе ничего нового – это, действительно, здравый смысл.
- Процедура ALARA в равной мере применима к оптимизации вопросов радиационной безопасности как на стадии эксплуатации, так и на стадии проектирования. Различие заключается только в наборе анализируемых факторов.
- Уровень решения обычно определяет объем усилий, которые должны быть затрачены на исследование и представление результатов. В рассмотренном примере решение было весьма низкого уровня и требовало относительно малых усилий.
- Были обсуждены только два метода поддержки принятия решений – метод итоговой стоимости анализа «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА» и дифференциальный анализ «ЗАТРАТЫ - ВЫГОДА». Если рассматриваемые факторы и их числовые значения останутся неизменными, то результат ALARA не будет зависеть от того, по какой из обсуждаемых методик проводились расчеты. Для сложных задач, включающих дополнительные факторы, помимо расходов и дозы может потребоваться использование других методов.

- Анализ чувствительности должен выполняться для проверки устойчивости результатов любого анализа. Для этого нужно рассмотреть любые возможные вариации, а также любые неопределенности в данных.
- Процедура ALARA является только помощником в принятии решения. Окончательное решение остается прерогативой специалиста, ответственного за его принятие.

2.9. УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И РИСКОМ

Управление безопасностью и риском это направленная деятельность на государственном, региональном и производственном уровне по обеспечению безопасности населения, народнохозяйственных объектов и окружающей среды от воздействия антропогенных аварий и катастроф, а также, в более широком смысле, от всего комплекса неблагоприятных воздействий, в том числе политических и социально-экономических [22].

Как уже отмечалось, в литературе встречается различное толкование термина «риск». Однако общим для многих из этих определений является то, что риск подразумевает неуверенность, произойдет ли нежелательное событие и возникнет ли неблагоприятное состояние. Подобный недостаток информации роднит риск с принятием решений в условиях недетерминированной информации [23].

Очень часто понятие риска связывают с событиями, имеющими катастрофические последствиями. Отсюда вытекает отношение к такому риску как неприемлемому и к необходимости исключить такое событие из числа возможных событий любой ценой. Если речь идет о жизни и здоровье человека, подобное представление акцентируется особо и формализуется в различных инструкциях, например, по технике безопасности. Следует еще раз подчеркнуть, что технических устройств с нулевым уровнем риска быть не может, какие бы затраты на их создание ни использовались. Но в технической области мы далеко не всегда имеем дело с экстремально опасными обстоятельствами. И в этом смысле, ущерб в связи с принятым с учетом риска решением, вполне может оказаться ничтожно малым по сравнению с затратами на предотвращение потенциального ущерба. Поэтому понятие риска в задачах принятии технических решений может иметь свою специфику.

Варианты процедуры принятия решений с риском можно разделить на группы с:

уменьшением риска,

минимизацией риска,

оптимизацией риска.

Решения, связанные с риском, всегда вызывают сомнения, поскольку априори определить необходимые вложения для четкого разделения оправданного и неоправданного риска практически невозможно. Выяснить, был ли данный риск оправдан, удается только после наступления нежелательного события.

Надежные предпосылки для определения риска зачастую дает сравнение данной ситуации с аналогичными ситуациями в прошлом. Однако проблему оценки это, как правило, не решает. В определенных случаях можно ограничиться требованием, чтобы допустимый риск был заведомо ниже риска, имевшего место в аналогичных ситуациях в прошлом. Однако в других случаях, особенно при больших затратах, это не решает задачу. Часто выдвигаемому требованию четко ограничить допустимые вероятности реализации нежелательного события препятствуют следующие положения:

- подобного рода границы должны быть независимыми от экономических затрат, аналогичная независимость должна существовать и для угрозы безопасности людей и материальным ценностям;
- законодатели должны для подобных границ принимать общее решение, которое учитывает всю специфику частных случаев;
- утверждение, что такие границы соблюдаются, может освободить ЛПР от обязанности анализировать ситуацию дальше и еще больше повышать безопасность людей. При этом возможны ситуации, когда при небольших затратах опасность может быть значительно снижена, а этим пренебрегают, поскольку границы установлены;
- утверждение, что соблюдаются определенные границы, предполагает качественное единство данных, что, как правило, не-

достижимо, так как имеют место проблемы самого различного типа;

- ограничения допустимого риска зависят от времени и меняются с изменением экономических и технических условий.

Угроза безопасности людей, как уже отмечалось, чаще всего включает различные составляющие риска: основного существующего риска, риска из-за ошибок и риска, на который идут сознательно при определенных условиях. При дальнейшем рассмотрении получаемые результаты будут относиться, главным образом к основному риску.

2.9.1. Основная формальная структура принятия решений

Принятие решений представляет собой выбор одного из некоторого множества рассматриваемых вариантов: $E_i \in E$, i=1,…m.

Пусть каждому варианту решения E_i соответствует результат e_i. Будем считать, что каждый результат допускает количественную оценку. Будем отождествлять эти оценки с результатами, обозначая их одним и тем же символом e_i.

Без нарушения общности будем искать вариант с наибольшим результатом, т.е. max e_i по i. Это оправдано, если оценки характеризуют, например, надежность, полезность, прибыль. Вариант с оценкой потерь можно исследовать путем минимизации e_i или рассматривать отрицательные величины полезности.

Выбор оптимального варианта производится с помощью критерия

$$E_0 = \left[E_{i0} \middle| E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i e_i \right]. \qquad (2.10)$$

Т.е. множество E_0 оптимальных вариантов состоит из вариантов E_{0i}, которые принадлежат множеству E всех вариантов и оценка e_{i0} которых максимальна среди всех оценок e_i.

Выбор оптимального варианта в соответствии с критерием (2.10) не всегда является однозначным, т.к. максимум оценки может достигаться на множестве результатов не единожды. На практике это приводит к необходимости выбора одного решения из нескольких хороших, как правило, не сильно различающихся. Это не вызывает значительных проблем. Поэтому не будем специально останавливаться на данном вопросе.

Такой случай принятия решений, когда каждому варианту решения соответствует единственное внешнее состояние, и, следовательно, однозначно определяется единственный результат, называется случаем детерминированных решений. В более сложных случаях каждому допустимому варианту решения E_i могут соответствовать различные внешние условия (состояния) F_j (j=1, 2, …, n) и, соответственно, результаты e_{ij} решений. Под результатом e_{ij} будем понимать оценку, соответствующую решению E_i и условиям F_j и характеризующим, например, надежность, полезность или прибыль. Будем называть его полезностью решения. В этом случае семейство решений описывается *матрицей решений* (табл. 2.18). Увеличение объема семейства по сравнению с вариантом детерминированных решений объясняется как недостатком информации, так и многообразием технических возможностей.

Таблица 2.18

Матрица решений

	F_1	F_2	…	F_j	…	F_n
E_1	e_{11}	e_{12}	…	e_{1j}	…	e_{1n}
E_2	e_{21}	e_{22}	…	e_{2j}	…	e_{2n}
…	…	…	…	…	…	…
E_i	e_{i1}	e_{i2}	…	e_{ij}	…	e_{in}
…	…	…	…	…	…	…
E_m	e_{m1}	e_{m2}	…	e_{mj}	…	e_{mn}

ЛПР и здесь стремится выбрать вариант решения с лучшим результатом, но поскольку заранее неизвестно, с какими внешними условиями придется иметь дело, приходится принимать во внимание все оценки e_{ij}, соответствующие решению E_i. Поэтому задачу

максимизации e_i в соответствии с критерием (2.10) следует заменить другой, учитывающей все последствия каждого из вариантов решения E_i.

2.9.2. Оценочная функция

Для того чтобы прийти к однозначному и по возможности наилучшему решению и в случае, когда вариантам решения E_i соответствуют различные внешние условия F_j, вводятся некие оценочные (целевые) функции. Каждому варианту решения E_i приписывается некоторый результат e_{ir}, который характеризует все последствия этого решения. При этом матрица решений сводится к одному столбцу.

Какой смысл вложить в результат e_{ir}?

Если последствия решений характеризовать комбинацией из наибольшего и наименьшего результатов, то

$$e_{ir} = \min_j e_{ij} + \max_j e_{ij}. \qquad (2.11)$$

Наилучший результат при этом имеет вид

$$\max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij} + \max_j e_{ij}). \qquad (2.12)$$

В приведенном случае ЛПР исходит из компромисса между пессимистической и оптимистической позициями.

Можно рассмотреть и другие варианты оценочных функций.

Пессимистическая позиция:

$$\max_i e_{ir} = \max_i \min_j e_{ij}. \qquad (2.13)$$

При этом ЛПР ориентируется на наименее благоприятный случай, приписывая каждому из альтернативных вариантов наихудший результат из возможных. После этого выбирается самый вы-

годный вариант. Иными словами, ожидается наилучший вариант в наихудшем случае.

Оптимистическая позиция:

$$\max_i e_{ir} = \max_i \max_j e_{ij}. \qquad (2.14)$$

В каждой строке матрицы решений выбирается наибольший результат. Затем из получившегося столбца выбирается результат, имеющий наибольшее значение.

Позиция нейтралитета:

$$\max_i e_{ir} = \max_i (\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} e_{ij}). \qquad (2.15)$$

Предполагается, что все имеющиеся отклонения результатов решений от «среднего» одинаково возможны, и выбирается вариант, оптимальный с этой точки зрения

Позиция относительного пессимизма:

$$\min_i e_{ir} = \min_i \max_j (\max_i e_{ij} - e_{ij}). \qquad (2.16)$$

Можно привести и другие примеры оценочных функций. Некоторые из них довольно широко используются в практической деятельности. В ситуации, когда внешние условия не известны, часто ориентируются на наиболее неблагоприятную ситуацию, выбирая оценочную функцию пессимизма (2.13).

Влияние позиции ЛПР на эффективность результата решения можно интерпретировать графически на плоскости, рассматривая случай с двумя внешними состояниями (n=2) при m вариантах решений.

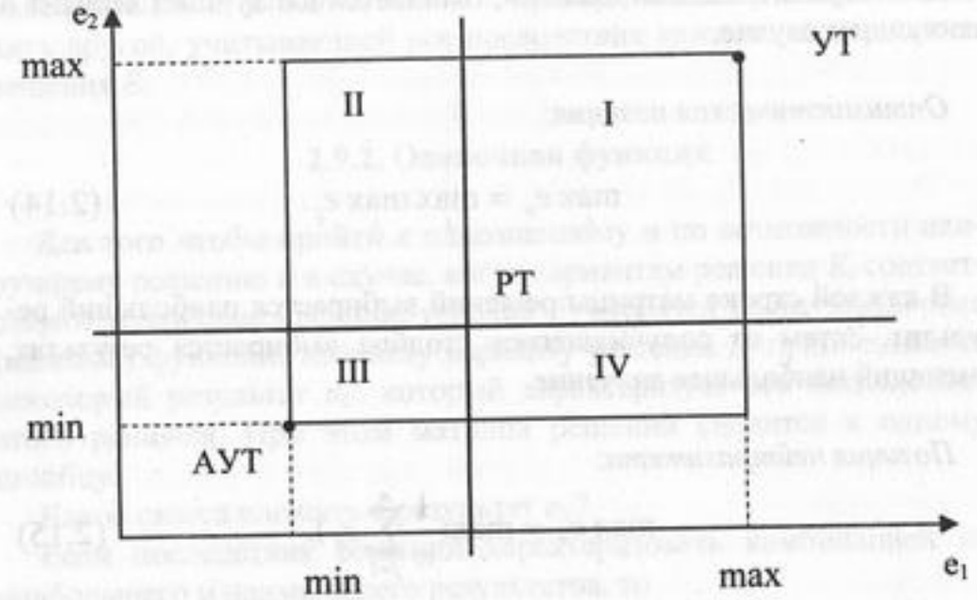


Рис. 2.17. Поле выбора решений

По оси абсцисс будем откладывать значения результата решения e_{i1}, соответствующие внешнему состоянию F_1, а по оси ординат – значения e_{i2}, соответствующие состоянию F_2. При этом каждому варианту решения E_i соответствует точка с координатами (e_{i1}, e_{i2}), i=1, 2, …, m на плоскости. Точку с координатами (max e_{i1}, max e_{i2}) назовем утопической точкой (УТ). Координаты всех точек (e_{i1}, e_{i2}), i=1, 2, …, m, соответствующих вариантам решений E_1, …, E_m, не могут быть больше, чем у УТ. Для аналогичной антиутопической точки (АУТ) координаты всех точек решений не могут быть меньше, чем у АУТ. Следовательно, все m точек решений лежат внутри прямоугольника, стороны которого параллельны осям координат, а противоположные вершины есть точки УТ и АУТ. Этот прямоугольник назовем полем полезности решений. Для сравнения вариантов решений с точки зрения из качества, назовем вариант решения E_k не худшим, чем E_s если для соответствующих точек (e_{k1}, e_{k2}) и (e_{s1}, e_{s2}) выполняются неравенства $e_{k1} \geq e_{s1}$ и $e_{k2} \geq e_{s2}$. Вариант E_k

считается лучшим, чем E_s, если хотя бы одно из этих неравенств выполняется строго.

При таком определении не любые два варианта решений допускают сравнение в том смысле, что один из них будет лучше другого. Например, для двух указанных точек выполняются неравенства $e_{k1} > e_{s1}$ и $e_{k2} < e_{s2}$. Математически это можно сформулировать как установление отношения частичного порядка на множестве вариантов решений. Свойства этого отношения можно проиллюстрировать на рис. 2.17. Выберем в поле полезности произвольную рассматриваемую точку (РТ). Проведя через нее прямые, параллельные координатным осям, получим четыре части. Обозначим их I, II, III, IV. Для нашего двумерного случая каждая из этих частей имеет вид (бесконечного) прямоугольника. Для случая произвольной размерности они превращаются в так называемые конусы.

Анализируя положение точек поля полезности относительно этих четырех конусов (прямоугольников), можно констатировать следующее. В смысле введенного выше частичного порядка, все точки конуса I лучше, чем РТ. Поэтому этот конус называется *конусом предпочтения*. Наоборот, для конуса III все точки хуже, чем РТ. Этот конус называется антиконусом. Следовательно, для этих конусов оценка качества точек, им принадлежащих, в сравнении с РТ проста и однозначна. Для точек конусов II и IV подобная оценка является неопределенной. Поэтому эти конуса называют *конусами неопределенности*. Для этих точек оценку можно получить только с использованием выбранного критерия принятия решений.

Критерий принятия решений для случая m вариантов решений и n внешних условий можно записать как

$$\max K(e_{i1}, \ldots, e_{in}), \quad i=1, \ldots, m, \tag{2.17}$$

или

$$\min K(e_{i1}, \ldots, e_{in}), \quad i=1, \ldots, m. \tag{2.18}$$

K является функцией n переменных, характеризует соответствующий критерий и одновременно задает оценочную функцию. Рассмотрим эту функцию в n-мерном пространстве R^n. Запишем

$$K(e_{i1}, \ldots, e_{in}) = k. \qquad (2.19)$$

Конкретным значениям k ставится в соответствие гиперплоскость в R^n, называемая *поверхностью уровня*. В двумерном случае

$$K(e_{i1}, e_{i2}) = k, \qquad (2.20)$$

получаем на плоскости кривую, называемую линией уровня, соответствующей значению k. Для фиксированного k уравнение (2.20) определяет функциональную зависимость между e_{i1} и e_{i2}, которая называется *функцией предпочтения*. Назовем этим же термином и соответствующую кривую на плоскости (e_{i1}, e_{i2}).

Используем для анализа приведенную выше оценочную функцию (2.15) для позиции нейтралитета. Получаем семейство функций предпочтения, зависящих от параметра k:

$$(e_{i1}+e_{i2})/2 = k. \qquad (2.21)$$

На графике это выражение дает прямые, параллельные биссектрисе второго и четвертого квадрантов плоскости. Соответственно, мы назовем нейтральной и соответствующую ей функцию предпочтения.

Рассмотрим произвольную точку РТ на какой-либо линии уровня этого критерия и проведем через нее «осевой крест». Он разбивает плоскость на описанные выше четыре квадранта: предпочтения, антипредпочтения и неопределенностей.

Условно можно сказать, что все точки из областей неопределенностей, лежащие справа и выше этой линии уровня в смысле нашего критерия, лучше точек, лежащих слева и ниже. Это же справедливо и для любого другого критерия (рис. 2.18.).

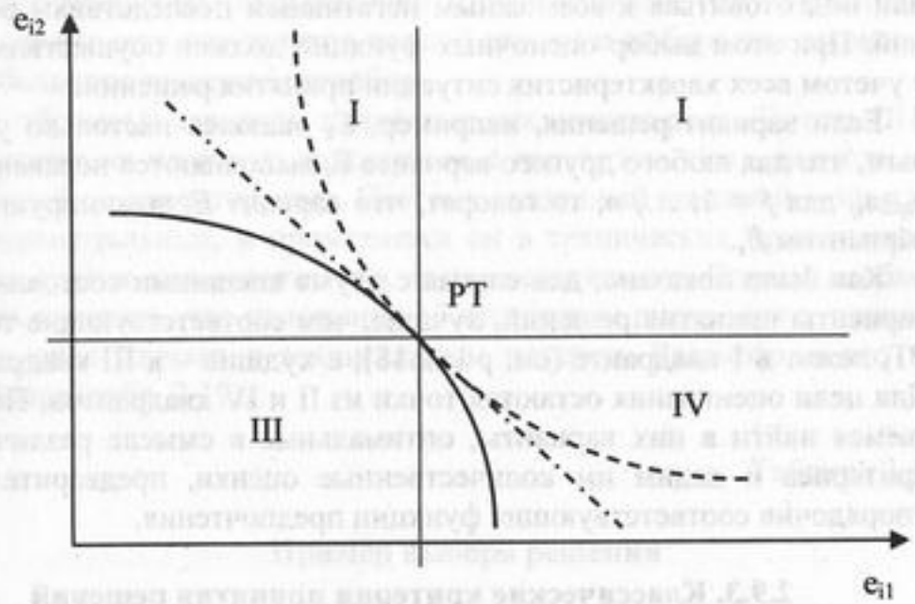


Рис. 2.18. Функции предпочтения для принятия решений
сплошная линия – оптимистическая позиция, штрихпунктирная – нейтральная; пунктирная – пессимистическая

Если некоторому критерию на графике соответствует вогнутая кривая (штриховая), то в соответствующих ей областях неопределенности имеется меньшее число точек, чем при нейтральном критерии (штрихпунктирная линия). Эта вогнутая кривая характеризует пессимистическую позицию ЛПР. Сплошная выпуклая кривая соответствует оптимистическому подходу. Для нее имеется большее число лучших точек в областях неопределенности по сравнению с нейтральным критерием. Предельным случаем оптимистической позиции являются граничные прямые квадранта III, а пессимистической – квадранта I. Чем ближе подходят кривые предпочтения к этим граничным прямым, тем в большей степени они соответствуют оптимистической (пессимистической) позиции.

Всякое решение в условиях неполной информации (сознательно или неосознанно) принимается в соответствии с какой-либо оценочной функцией. Если это признается, то следствия решений становятся более прозрачными, что дает возможность улучшить их

или подготовиться к возможным негативным последствиям решений. При этом выбор оценочных функций должен осуществляться с учетом всех характеристик ситуации принятия решений.

Если вариант решения, например, E_k оказался настолько удачным, что для любого другого варианта E_s выполняются неравенства $e_{kj} \geq e_{sj}$ для $j = 1, \ldots, n$, то говорят, что вариант E_k доминирует над вариантом E_s.

Как было показано, для случая с двумя внешними состояниями варианты принятия решений, лучшие, чем соответствующие точке РТ, лежат в I квадранте (см. рис.2.18), а худшие – в III квадранте. Для цели оценивания остаются точки из II и IV квадрантов. Попытаемся найти в них варианты, оптимальные в смысле различных критериев и дадим им количественные оценки, предварительно упорядочив соответствующие функции предпочтения.

2.9.3. Классические критерии принятия решений

Минимаксный критерий (ММ)

Этот критерий использует оценочную функцию, которая соответствует позиции крайней осторожности:

$$Z_{MM} = \max_i e_{ir} \qquad (2.22)$$

и

$$e_{ir} = \min e_{ij} \qquad (2.23)$$

справедливо выражение

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \middle| E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i \min_j e_{ij} \right\}, \qquad (2.24)$$

где Z_{MM} – оценочная функция ММ-критерия.

Фактически матрица решений дополняется еще одним столбцом из наименьших результатов каждой строки и выбирается вариант с наибольшим значением столбца.

Выбранные варианты полностью исключают риск. То есть ЛПР не может на практике столкнуться с вариантом хуже, чет тот, на который он ориентируется. Поэтому указанный критерий – один из фундаментальных, и применяется он в технических приложениях чаще других как сознательно, так и неосознанно. Однако необходимо отметить, что положение об отсутствии риска может привести в ряде случаев к значительным потерям. Рассмотрим это на примере (табл. 2.19).

Таблица 2.19

Пример выбора решения

Решение	Внешние состояние		e_{ir}	$\max_i e_{ir}$
	F_1	F_2		
E_1	2	200	2	
E_2	2.1	2.1	2.1	**2.1**

В соответствии с ММ-критерием оптимальным вариантом является $E_0 = E_2$. Однако из рассмотрения видно, что вариант E_1 является более выгодным.

Принятие решения по ММ-критерию может оказаться еще менее целесообразным, если решение реализуется многократно, и состояние F_2 встречается чаще, чем состояние F_1.

Выбирая E_2 в соответствие с ММ-критерием, мы избегаем неудачного значения 2, которое реализуется в варианте E_1 при F_1, однако, при F_2 теряем выигрыш 200, получая только 2.1.Видно, что пессимизм ММ-критерия может оказаться невыгодным во многих практических ситуациях.

Считается, что применение ММ-критерия оправданно, если решение реализуется один раз; о возможности появления внешних состояний F_j ничего не известно;

• приходится считаться с возможностью появления различных внешних состояний;

• следует исключить любой риск, т.е. ни при каких условиях F_j не допускается получение результата меньше, чем Z_{MM}.

Более подробно проблема риска, связанного с принятием решений, будет обсуждаться ниже.

Критерий Байеса – Лапласа (BL)

Если в предыдущем случае при построении оценочной функции каждый вариант E_i был представлен лишь одним из результатов, то критерий Байеса–Лапласа учитывает каждое из значений:

$$Z_{BL} = \max_i e_{ir}, \tag{2.25}$$

$$e_{ir} = \sum_{j=1}^{n} e_{ij} q_j, \tag{2.26}$$

справедливо выражение

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \middle| E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i \sum_{j=1}^{n} e_{ij} q_j \wedge \sum_{j=1}^{n} q_j = 1 \right\}, \tag{2.27}$$

В приведенных выражениях q_j – вероятность появления внешнего состояния F_j.

При использовании BL-критерия предполагается:

• решение, по крайней мере теоретически, реализуется бесконечно много раз;

• вероятности появления состояний F_j известны и не зависят от времени;

• для малого числа реализаций допускается некоторый риск.

Позиция ЛПР, применяющего BL-критерий более оптимистична, чем в случае ММ-критерия; но при этом предполагается более высокий уровень информированности и достаточно длинные реализации.

Известны и другие классические критерии.

Необходимо отметить, что вследствие жесткости исходной позиции классические критерии применимы только для идеализированных решений. Кроме того, прежде чем рекомендовать тот или иной критерий, желательно получить дополнительную информацию о ситуации.

2.9.4. Производные критерии

Критерий Гурвица (HW)

Чтобы занять уравновешенную позицию между крайним пессимизмом и предельным оптимизмом, Гурвиц предложил оценочную функцию

$$Z_{HW} = \max_i e_{ir}, \tag{2.28}$$

$$e_{ir} = c \min_j e_{ij} + (1-c) \max_j e_{ij}. \tag{2.29}$$

Тогда

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \middle| E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i [c \min_j e_{ij} + (1-c) \max_j e_{ij}] \wedge 0 \le c \le 1 \right\}, \tag{2.30}$$

где c – весовой множитель.

При использовании этого критерия матрица решений дополняется столбцом, состоящим из взвешенных наименьших и наибольших результатов каждой строки, и выбирается вариант с наибольшим значением столбца.

При c = 1 HW-критерий трансформируется в ММ-критерий. Если c = 0 он превращается в критерий сверхазартного игрока. Таким

образом, правильный выбор весового множителя крайне важен. Однако выбрать его бывает так же сложно, как и определиться с выбором критерия. Поэтому на практике часто принимается c=0.5 в качестве «средней» позиции между оптимизмом и пессимизмом.

Необходимо отметить, что и этот критерий, несмотря на попытку уравновешивания точек зрения, может приводить к нерациональным решениям [23].

HW-критерий предполагает выполнение следующих положений:

- о вероятности появлений внешних состояний ничего не известно;
- с появлением различных внешних состояний необходимо считаться;
- реализуется малое количество решений;
- допускается некоторый риск.

Критерий Ходжа – Лемана (HL)

Этот критерий опирается на MM-критерий и на BL-критерий. При этом вводится параметр ν, который характеризует степень доверия к используемому распределению вероятностей. Если доверие велико – упор делается на BL-критерий, в противном случае предпочтение отдается MM-критерию.

Оценочная функция критерия определяется выражением

$$Z_{HL} = \max_i e_{ir}, \tag{2.31}$$

$$e_{ir} = \nu \sum_{j=1}^{n} e_{ij} q_j + (1-\nu) \min_j e_{ij}, \tag{2.32}$$

а множество HL оптимальных решений записывается как

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \middle| E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i [\nu \sum_{j=1}^{n} e_{ij} q_j + (1-\nu) \min_j e_{ij}] \wedge 0 \le \nu \le 1 \right\}. \tag{2.33}$$

Таким образом, матрица решений дополняется столбцом, составленным из средних взвешенных математического ожидания и наименьшего результата каждой строки.

При ν=1 HL-критерий превращается в BL-критерий, а при ν=0 переходит в MM-критерий.

Естественно, выбор параметра ν субъективен. Кроме того, не учитывается число реализаций. Поэтому при принятии технических решений HL-критерий практически не применяется.

В общем случае использование критерий предполагает, что:

- вероятности появления внешних состояний неизвестны, но некоторые предположения о них возможны;
- принятое решение допускает бесконечно много реализаций;
- при малом числе реализаций допускается некоторый риск.

Известны и другие производные критерии. Считается, что при выполнении рекомендаций по их использованию [23] повышается надежность решения.

2.9.5. Принятие решений при наличии риска

В рамках данного издания не представляется возможным проведение детального анализа этого вопроса. Поэтому будет дан лишь краткий алгоритм для его рассмотрения. Более подробную информацию можно найти, например, в [23].

В основе рассмотрений ситуаций принятия решений, связанных с риском, лежит предположение о том, что решение, соответствующее наименьшему значению $\min_j x_j$ из ряда допустимых значений параметра x_j приводит к самым неблагоприятным последствиям. Кроме того, предполагается, что эти значения являются реализацией случайного процесса с соответствующими относительными частотами распределения h_1, h_2, …, h_m, которые в свою очередь, сходятся к (теоретическим) вероятностям p_1, p_2, …, p_n этих значений параметра. Средняя величина заданного ряда значений параметра должна существенно отличаться от наименьшего из его значений $\min_j x_j$, что будет характеризоваться так называемым *доверительным фактором*, оцениваемым заранее задаваемой величи-

ной вероятности α принятия ошибочного решения. При этом будем различать три принципиально разных случая:

1. На основании известной выборки значений параметра или по результатам проведения у экспериментов по определению его значений оценивается относительная величина отклонения теоретического среднего значения от его наименьшего значения; это осуществляется с использованием *эмпирического доверительного фактора* $V_y(\alpha)$.
2. При известных вероятностях $p_1, p_2, \ldots, p_n$ оценивается относительная величина отклонения среднего значения из выборки, полученной при проведении серии w экспериментов, от наименьшего значения параметра; при этом используется *прогностический доверительный фактор* $V^w(\alpha)$.
3. Относительная величина отклонения среднего значения параметра от его наименьшего значения оценивается для проведения серии из w экспериментов по результатам известной выборки из у экспериментов; это осуществляется с использованием эмпирико-прогностического доверительного фактора $V_y^w(\alpha)$.

Последний подход включает в себя задачи двух предшествующих и лучше других адаптируется к практическим задачам.

Допущение даже малой вероятности α принятия ошибочного решения не исключает возможности риска даже с учетом введенных доверительных факторов.

Полное устранение риска при принятии решений и не требуется; более того, некоторый риск вводится сознательно, поскольку принятие решений без риска, с предельно пессимистических позиций, как было показано выше, зачастую просто не выгодно. При этом оправданный риск следует отличать от риска азартного игрока. Во-первых, риск должен по возможности учитываться полно, (количественно) описываться и ограничиваться. Во-вторых, не превышать уровень, при котором результат достигается с достаточной надежностью.

В качестве выражения для оценки риска примем выражение (2.24) для совокупности вариантов решения по минимаксному критерию, которое соответствует позиции крайней осторожности. При

выборе вместо оптимального по данному критерию какого-либо другого варианта E_i степень неоптимальности можно вычислить в виде дефекта варианта решения E_i относительно опорного значения оценочной функции по ММ-критерию

$$\varepsilon_i^{возм} = Z_{мм} - \min_j e_{ij}. \qquad (2.34)$$

Максимальную разность дефектов при рассмотрении всех возможных вариантов решения E_i, i=1, …, m, можно охарактеризовать как возможный риск

$$\varepsilon^{возм} = \max_i (Z_{мм} - \min_j e_{ij}) - \min_i (Z_{мм} - \min_j e_{ij}) = Z_{мм} - \min_i \min_j e_{ij}. \qquad (2.35)$$

Следовательно, возможный риск $\varepsilon^{возм}$ независимо от информации о параметрах, имеющейся по результатам выборки, а также от числа реализаций процесса представляет собой максимально возможную величину нереализуемой полезности решения. При малых значениях объема y выборки и числа реализаций w безопаснее придерживаться ММ-критерия, при больших целесообразно ориентироваться на BL-критерий. Оба они обобщаются BL-критерием, по усовершенствованному варианту которого оптимальным считается решение E_i, для которого выражение

$$\varepsilon_{ir} = u_i \sum_{j=1}^{n} e_{ij} h_j + (1 - u_i) \min_j e_{ij}. \qquad (2.36)$$

дает максимальное значение. Значения h_j, j=1, …, n – оценки вероятностей внешних условий Fj, j=1, …, n. В качестве u_i целесообразно использовать эмпирико-прогностический доверительный фактор $V_y^w(\alpha)$:

$$V_y^w(\alpha)_{\substack{\uparrow \\ y\to\infty \\ w\to\infty}} 1, \quad \text{а также} \quad V_y^w(\alpha) \underset{y\to 0}{\downarrow} 0 \quad \text{и} \quad V_y^w(\alpha) \underset{y\to 1}{\downarrow} 0. \qquad (2.37)$$

Видно, что при больших объемах выборки y и одновременно большом числе реализаций w улучшенный HL-критерий приближается к нейтральному BL-критерию, а в случае малого объема выборки y и/или числа реализаций w – к ММ-критерию.

Таким образом, при наличии информации о вероятностях внешних состояний F_j, даже в случае малого числа реализаций w (что будет отражено в малости величины доверительного фактора) имеет смысл выйти за рамки следования минимаксному критерию, если ЛПР готов пойти на некоторый риск, определяемый величиной $\varepsilon^{доп}$. Для некоторых вариантов внешних условий, имеющих большую вероятность реализации, могут получиться варианты решения, дающие значительный выигрыш по сравнению с оптимальным решением по ММ-критерию. С целью оценки конкурентоспособности этих решений введем для каждого варианта E_i величину, равную сумме минимального результата $\min_j e_{ij}, j = 1,...,n$ и эффекта риска:

$$\min_j e_{ij} + \varepsilon_i. \qquad (2.38)$$

Величина ε_i по смыслу должна отвечать ограничению

$$\varepsilon_i = \min(\varepsilon_i^{возм}, \varepsilon^{доп}). \qquad (2.39)$$

Этим гарантируется непревышение величиной ε_i значения дефекта i-го решения по отношению к оптимуму, полученному по минимаксному критерию (2.34), а также величины допустимого риска $\varepsilon^{доп}$. Максимальный риск при рассмотрении всех вариантов решения E_i, i=1, …, m, равняется:

$$\varepsilon = \max_i \varepsilon_i = \max_i \min(\varepsilon_i^{возм}, \varepsilon^{доп}). \qquad (2.40)$$

2.9.6. Гибкий критерий выбора решений

Предлагается критерий выбора решений, который гибко сочетается с качественными характеристиками исходной информации и числом реализаций решения, что характеризуется, соответственно, эмпирическим и прогностическим доверительными факторами. Проводится также учет возможного риска, который ограничен его допустимой величиной. В приведенном ниже случае при помощи пяти условий G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 описывается множество E_0 оптимальных согласно гибкому критерию решений $E_i \in E_0$ в виде

$$E_0 = \{E_i | G_1 \wedge (G_2 \vee G_3) \wedge G_4 \wedge G_5\}. \qquad (2.41)$$

При этом условия G_k формально характеризуются следующими соотношениями:

G_1: $E_i \in E$;

G_2: доверительный фактор равняется допустимому доверительному фактору;

G_3: $ZZ_{ММ} - \min_j e_{ij} \le \varepsilon_{доп}$;

G_4: используется гибкая оценочная функция;

G_5: дополнительное условие.

Условие G_1 соответствует тому, что при выборе оптимального варианта решения рассмотрению подлежат все возможные варианты из множества E. Условия G_2 и G_3 определяют границы величины допустимого риска при использовании гибкого критерия G_1. Оценочная функция гибкого критерия G_4 может содержать величину ε_i, определяющую возможный риск при принятии решения. Согласно условию G_5 из полученного множества в качестве оптимальных выбираются только варианты решения, оптимальные в смысле BL-критерия.

Ряд условий в выражении (2.41) определяет процедуру принятия решения, которая заключается в фиксации допустимых границ риска с последующим выполнением в рамках заданных возможно-

стей поиска оптимального варианта решения. Такой вариант представляется наиболее целесообразным при разработке алгоритмов принятия решения с использованием ЭВМ.

2.9.7. Использование нечетких моделей принятия решений

В ситуации, связанной с большой неопределенностью, нечеткостью, фрагментарностью исходных данных, как правило, нет необходимости формулировать задачу с высокой точностью. Мы вынуждены прибегнуть к нечеткому описанию задачи в рамках теорий, базирующихся на теории нечетких множеств. Рассмотрим это на конкретном примере.

Предположим, что имеются:

1. Множество вариантов решения E;
2. Ограничивающие дополнительные условия;
3. Одна или много целевых функций.

Пусть в качестве:

1. вариантов решения выступают все неотрицательные числа $E=R^+$. Это можно учесть, введя функцию принадлежности, например, вида

$$\mu_V(x)=\begin{cases}0, & \textit{если} \quad x<0\\ 1, & \textit{если} \quad x\geq 0.\end{cases} \tag{2.42}$$

2. «$x\in E$ должно находиться в окрестностях числа 11». Это может быть учтено с использованием функции принадлежности

$$\mu_R(x)=1/[1+(x-11)^4]. \tag{2.43}$$

3. «x должно быть значительно больше 10». Это можно учесть, введя функцию принадлежности, например, вида:

$$\mu_O(x)=\begin{cases}0, & \textit{если} \quad x<10\\ 1-[1+(\dfrac{x-10}{5})^2]^{-1}, & \textit{если} \quad x\geq 10.\end{cases} \tag{2.44}$$

В качестве функции принадлежности для множества решений можно использовать функцию, образующуюся в результате пересечения трех приведенных выше функций принадлежности. В качестве операции пересечения может быть выбрана, в частности, операция минимума:

$$\mu_E(x)=\min[\,\mu_V(x),\mu_R(x),\mu_O(x)]. \tag{2.45}$$

Каждому рациональному варианту решения x будет соответствовать свое значение функции принадлежности $\mu_E(x)$ - в области пересечения μ_R и μ_O (рис. 2.19). В качестве результата, т.е. обычного (не нечеткого) значения можно выбрать значение x^*, соответствующее максимальному значению функций принадлежности $\mu_E(x)$. Этот процесс называется дефаззификацией. Отметим, что известны и другие варианты дефаззификации, например, методы: центра тяжести, центра площади, модальных значений.

Приведенные выше методы принятия технических решений являются, фактически, основой, введением в принципы и практику способов принятия решений. Существуют системы, касающиеся так называемых многокритериальных задач (задач с векторными целевыми функциями); системы решений с иерархической структурой, зависящей от выбора стратегии (например, главный и второстепенный игроки); динамические игры, т.е. многошаговые процессы выбора решений со случайными влияниями, в которых, по крайней мере, два партнера имеют различные интересы.

Эти проблемы находятся в процессе активных исследований, и даже краткое их изложение требует значительного места.

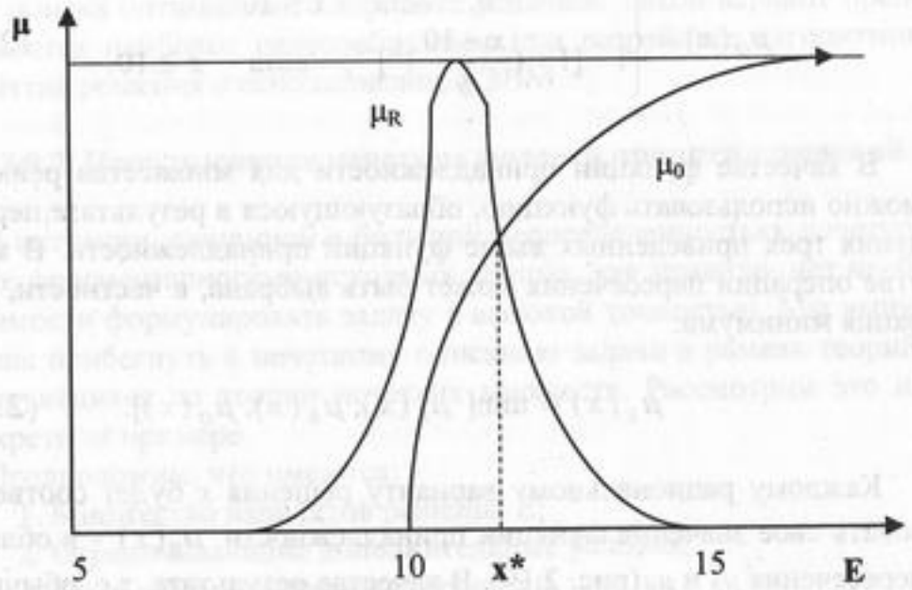


Рис. 2.19. Построение функции принадлежности решения

2.10. СТРАХОВАНИЕ РИСКОВ

Отношения, возникающие при использовании атомной энергии в мирных и оборонных целях, регулирует Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» [24].

Федеральный закон определяет правовую основу и принципы регулирования отношений, возникающих при использовании атомной энергии, направлен на защиту здоровья и жизни людей, охрану окружающей среды, защиту собственности при использовании атомной энергии, призван способствовать развитию атомной науки и техники, содействовать укреплению международного режима безопасного использования атомной энергии.

Основными принципами правового регулирования в области использования атомной энергии являются:

- обеспечение безопасности при использовании атомной энергии – защита отдельных лиц, населения и окружающей среды от радиационной опасности;
- доступность информации, связанной с использованием атомной энергии, если эта информация не содержит сведений, составляющих государственную тайну;
- участие граждан, коммерческих и некоммерческих организаций, иных юридических лиц в обсуждении государственной политики, проектов федеральных законов и иных правовых актов Российской Федерации, а также в практической деятельности в области использования атомной энергии;
- возмещение ущерба, причиненного радиационным воздействием;
- предоставление работникам объектов использования атомной энергии социально-экономических компенсаций за негативное воздействие ионизирующего излучения на здоровье человека и за дополнительные факторы риска;
- обеспечение социальной защиты граждан, проживающих и (или) осуществляющих трудовую деятельность в районах расположения этих объектов.

Объектами применения федерального закона являются:

- ядерные установки;
- сооружения и комплексы с промышленными, экспериментальными и исследовательскими ядерными реакторами, критическими и подкритическими ядерными стендами;
- сооружения, комплексы, полигоны, установки и устройства с ядерными зарядами для использования в мирных целях;
- другие содержащие ядерные материалы сооружения, комплексы, установки для производства, использования, переработки, транспортирования ядерного топлива и ядерных материалов;
- радиационные источники – не относящиеся к ядерным установкам комплексы, установки, аппараты, оборудование и изделия, в которых содержатся радиоактивные вещества или генерируется ионизирующее излучение;
- пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ;

- тепловыделяющие сборки ядерных реакторов;
- облученные тепловыделяющие сборки ядерного реактора – облученные в ядерном реакторе и извлеченные из него тепловыделяющие сборки, содержащие отработавшее ядерное топливо;
- ядерные материалы – материалы, содержащие или способные воспроизвести делящиеся (расщепляющиеся) ядерные вещества;
- радиоактивные вещества – не относящиеся к ядерным материалам вещества, испускающие ионизирующее излучение;
- радиоактивные отходы – ядерные материалы и радиоактивные вещества, дальнейшее использование которых не предусматривается.

Федеральный закон распространяется на следующие виды деятельности в области использования атомной энергии:

- размещение, проектирование, сооружение, эксплуатацию и вывод из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения;
- разработку, производство, испытание, транспортирование, хранение, утилизацию, использование ядерных зарядов в мирных целях и обращение с ними;
- обращение с ядерными материалами и радиоактивными веществами, в том числе при разведке и добыче полезных ископаемых;
- обеспечение безопасности при использовании атомной энергии;
- контроль обеспечения ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности, за обеспечением санитарно-эпидемиологического благополучия граждан при использовании атомной энергии;
- проведение научных исследований во всех областях использования атомной энергии;
- физическую защиту ядерных установок, радиационных источников, пунктов хранения, ядерных материалов и радиоактивных веществ;

- учет и контроль ядерных материалов и радиоактивных веществ;
- экспорт и импорт ядерных установок, оборудования, технологий, ядерных материалов, радиоактивных веществ, специальных неядерных материалов и услуг в области использования атомной энергии;
- государственный контроль радиационной обстановки на территории Российской Федерации;
- подготовку специалистов.

В федеральной собственности или в собственности российских юридических лиц находятся:

ядерные материалы; ядерные установки; пункты хранения;

радиационные источники, радиоактивные вещества могут находиться в федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации, муниципальной собственности или в собственности юридических лиц.

Президентом Российской Федерации утверждается перечень ядерных материалов, установок, пунктов хранения, а также перечень российских юридических лиц, в собственности которых могут находиться ядерные материалы, установки, пункты хранения и т.п.

Собственники ядерных установок, радиационных источников, пунктов хранения, ядерных материалов, радиоактивных веществ осуществляют контроль над их сохранностью и надлежащим использованием.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии устанавливают требования к безопасному использованию атомной энергии, выполнение которых обязательно при осуществлении любого вида деятельности в области использования атомной энергии. Учитывают рекомендации международных организаций в области использования атомной энергии, в работе которых принимает участие Российская Федерация.

Гражданско-правовую ответственность за убытки, причиненные физическим и юридическим лицам радиационным воздействием при выполнении работ в области использования атомной энергии, несет эксплуатирующая организация. Ответственность эксплуати-

рующей организации за убытки и вред, причиненные радиационным воздействием, наступает независимо от вины эксплуатирующей организации. Если убытки и вред произошли вследствие непреодолимой силы, военных действий, вооруженных конфликтов и умысла самого потерпевшего, то эксплуатирующая организация освобождается от ответственности за убытки и вред.

Россия ратифицировала Венскую конвенцию 1963 года «О гражданской ответственности за ядерный ущерб», которая устанавливает минимальные нормы для обеспечения финансовой защиты от ущерба, возникающего в результате определенных видов мирового использования ядерной энергии.

В соответствии с Венской конвенцией ответственность оператора может быть ограничена отвечающим за установку государством не менее чем 5 млн. американских долларов США (по его золотому паритету на 29 апреля 1963 года) за каждый ядерный инцидент. В пересчете на рубли эта сумма сейчас составляет примерно 2,5 млрд. рублей [25].

От оператора ядерной установки требуется поддерживать страхование или другое финансовое обеспечение его ответственности, покрывающее его ответственность за ядерный ущерб [24-25].

Государство, отвечающее за установку, обеспечивает выплату возмещений по удовлетворенным исковым заявлениям против оператора за ядерный ущерб путем предоставления необходимых дополнительных средств в том размере, в каком размер страхования недостаточен для удовлетворения таких требований, но не выше установленного предела. В течение 10 лет со дня инцидента можно подать иск на права возмещения ущерба, причиненного вследствие ядерного инцидента [25].

Необходимым условием лицензирования эксплуатирующих организаций является наличие финансового обеспечения ответственности. В настоящий момент единственной доступной формой обеспечения ответственности эксплуатирующих организаций является страхование гражданской ответственности и предоставление страхового полиса в Ростехнадзор.

АЭС осуществляют страхование имущества, особо опасных объектов, гидротехнических сооружений, экологии, перевозки ядерных материалов, гражданской ответственности.

На случай крупной аварии, подобной Чернобыльской, создается ядерный страховой пул. Это объединение страховщиков с целью страхования больших рисков за возможный ядерный ущерб. В каждой стране, где есть АЭС, существует по одному ядерному пулу. Как правило, национальный страховой пул не в состоянии в одиночку покрыть ядерные риски в своей стране и часть рисков перестраховывает в зарубежных странах. Большинство ядерных страховых пулов осуществляет перестрахование на добровольной основе.

В России ядерный страховой пул существует с 1997 года, когда 20 страховых компаний заключили Соглашение о создании Российского ядерного страхового пула (РЯСП). Сегодня в РЯСП входит 24 страховые компании [26]. Каждый участник пула имеет определенную долю в общей страховой сумме по договору страхования, закрепленную в соглашении о создании РЯСПа. Доля участника определяется его положением при вступлении в пул, но она не может превышать 10 % его собственных средств. Страховые взносы каждому участнику по договорам страхования, а также страховая выплата каждого участника пропорциональны его доле в пуле.

По своей сути пул является монополистом, так как в стране он один и представляет интересы большинства страховых компаний. Посредническую деятельность по покупке и продаже страховых услуг осуществляет страховой брокер. Эта деятельность подразумевает содействие соглашению между сторонами и предусматривает ведение договоров по страхованию согласно волеизъявлению страхователя или страховщика. Конечной целью брокерской деятельности является нахождение условий и форм страхования, взаимоприемлемых для сторон.

В основе определения тарифной ставки лежит вероятность наступления страхового случая. Целью расчетов является определение нетто-ставки, с помощью которой определяется величина нетто-вноса страхователя, т.е. той суммы, которая идет непосредственно на выплаты по страховым случаям.

По методу расчета тарифной ставки и финансовых обязательств страховщика по страховым выплатам вся обязанность страхования делится на две части: страхование жизни (на случай дожития, страхование на случай смерти, пенсии и т.п.) и «рисковые виды страхо-

вания» (страхование от несчастного случая, болезней, страхование имущества, гражданской ответственности и т.д.).

Расчет страховых ставок в страховании жизни основан на так называемых таблицах смертности населения, в которых на основании демографической статистики в табличной форме отражена зависимость смертности населения от возраста, и на основании которой можно с большой точностью определить вероятность смерти человека определенного возраста в течение любого наперед заданного периода времени.

В «рисковых видах страхования» вероятность наступления страхового случая определяется из статистических данных. Фактически знание вероятности наступления страхового случая может быть взято в качестве нетто-ставки по данному виду страхования. При этом учитывают два обстоятельства: страховая сумма не всегда выплачивается в полном объеме; существует отклонение количества страховых случаев от того значения, которое получено на основании среднего значения вероятности. Если отклонение произошло в большую сторону, то собранных нетто-вносов может оказаться недостаточно для страховых выплат. Для учета этого к нетто-ставке добавляется слагаемое – рисковая надбавка.

Наличие законодательства и подписание международных конвенций определяет дальнейшую политику развития атомной отрасли Российской Федерации. Плюс к этому адекватное снижение страховых тарифов гарантирует развитие атомной отрасли и выполнение программы Президента Российской Федерации по развитию атомной отрасли Российской Федерации до 2010 года. Законодательство Российской Федерации и ратифицированная венская конвенция гарантирует безопасность атомной энергии для населения.

Экономический ущерб

Экономический ущерб от радиационной аварии определяется несколькими компонентами:

ущерб, наносимый здоровью персонала и населения поступлением радиоактивных веществ в организм в результате радиационной аварии, а также в процессе ликвидации ее последствий (дезактивации территории);

прямые затраты на ликвидацию последствий радиационной аварии (дезактивация производственных помещений, территории промплощадки и санитарно-защитной зоны, сбор, вывоз и захоронение РАО и др.);

загрязнение окружающей природной среды радиоактивными веществами;

ущерб, наносимый имуществу граждан и организаций;

ущерб, наносимый выведением земель из сельскохозяйственного оборота.

Методики расчета экономического ущерба

В настоящее время в России используется четыре методики расчета экономического ущерба.

1. Методика оценки возможного экономического и экологического ущерба от реализации внутренних и внешних угроз на АЭС концерна «Росэнергоатом», Москва, 2004 [27].

2. Межотраслевая методика расчета экономического ущерба от радиационных аварий при использовании радиоактивных веществ в народном хозяйстве, Санкт - Петербург, 1998 [28].

3. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций, Москва, 2004 [29].

4. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса, Москва, 2003 [30].

Методики 1 и 2

Методика 1 может быть использована для разработки и реализации мероприятий по повышению защищенности АС, разработки декларации промышленной безопасности АС, планирования мер по защите персонала, населения и территорий, ликвидации последствий радиационных аварий, страхования ответственности эксплуатирующей организации – концерна «Росэнергоатом». Позволяет определить ущерб от аварии третьим лицам, окружающей среде,

персоналу и самой АС, рассчитать затраты на ликвидацию последствий аварии.

Методики 1 и 2 похожи в определении ущерба. Существует разница между ними при определении ущерба вреда здоровью населения. Авторы методики 1 берут стоимость чел-Зв исходя из денежного эквивалента потери 1 человека-года жизни, который устанавливается методическими указаниями федерального органа Госсанэпиднадзора в размере не менее 1 годового душевого национального дохода (НРБ-99). Методика 2 определяет стоимость чел-Зв, следуя рекомендациям координационного совета по радиационному риску Минатома для расчетов экономического ущерба для здоровья. К примеру, человек получает дозу в 1 Зв, компенсация составит 20 000$. Этой суммы явно недостаточно для проведения комплексного и полного лечения.

Методика 1 рассматривает два вида ущерба здоровью:

ущерб здоровью при малых дозах оценивается исходя из стоимости 1 чел-Зв в 0,3 млн. руб.;

при больших дозах (острая лучевая болезнь, смерть) компенсация 1 человеку составляет 11 млн. руб./чел.

Единая межведомственная методика (3)

Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера учитывает те же параметры, что и рассмотренные ранее методики при определении ущерба третьим лицам.

Методика может быть использована для:

- оценки ущерба при расследовании аварий и чрезвычайных ситуаций;
- разработки декларации промышленной безопасности;
- определения величины финансового обеспечения гражданской ответственности собственников (эксплуатирующих организаций) за вред, причиненный в результате аварии опасного объекта, составления деклараций безопасности, планирования аварийно-спасательных работ, а также обоснования мероприятий, снижающих негативные последствия аварий;

- страхования гражданской ответственности собственников опасных объектов (эксплуатирующих организаций) за вред, причиненный в результате аварий на этих объектах, для определения размера страховой суммы;
- планирования аварийно-спасательных работ;
- обоснования мероприятий, снижающих негативные последствия аварий;
- прогнозирования размера сумм, необходимых для возмещения вреда от аварии опасного объекта и ликвидации ее последствий.

Методика учитывает безвозвратные потери трудовых ресурсов и потери государства, связанные с трудовыми ресурсами. Вред для здоровья оценивается количеством оказанных медицинских услуг пострадавшему населения в течение года после аварии. Методика не учитывает радиационное воздействие на человека в том случае, если не будет обращения в медицинское учреждение с жалобами на здоровье. Ущерб, причиненный имуществу физических и юридических лиц, определяется стоимостной оценкой восстановления поврежденного фонда. Проводится оценка возможности восстановления функционирования имущества. Для проведения подобной оценки необходимо привлечение компетентных организаций, что требует дополнительных материальных затрат.

Методика 4

Методика определяет размер вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений (ГТС) предприятий топливно-энергетического комплекса. Утверждена приказом МЧС России и Минэнерго России от 29 декабря 2003 г.

Данная методика разработана для определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС. Методика предназначена для определения величины вероятного вреда владельцами ГТС в целях определения величины финансового обеспечения ответственности владельцев ГТС при дек-

ларировании безопасности ГТС, а также при подаче заявки на включение ГТС в Российский регистр гидротехнических сооружений.

При оценке вреда сельскому хозяйству оценивают потери от ухудшения качества земли и недополучения сельскохозяйственной продукции. Методика оценивает ущерб элементам транспорта и связи.

2.11. РИСК ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ

2.11.1. Введение

Для того чтобы методология риска была полезным и эффективным инструментом принятия решений, она должна быть репрезентативной, т.е. должна адекватно учитывать и катастрофические риски.

Основная задача решений, учитывающих риски, не обязательно должна сводиться к тому, чтобы четко формулировать наилучшую стратегию (тактику) действий, а скорее избегать экстремально худшую и самую разрушительную стратегию, т.е. ту, при которой лечение оказывается опаснее, чем сама болезнь.

Риск обычно определяется как мера вероятности и серьезности неблагоприятных эффектов. Выражение в количественных категориях риска, трактуемого подобным образом и широко адаптированного ко многим дисциплинами, часто приводит к недоразумениям, ошибочным результатам и заключениям. Наиболее общее количественное выражение риска, использующее математическую конструкцию, известную как ожидаемая величина, является, вероятно, доминирующей причиной для подобных недоразумений в количественном определении риска. Независимо от того, как рассматриваются вероятности, ассоциированные с пространством событий – в дискретной или непрерывной форме, ожидаемая величина риска – действие, которое, по существу, предполагает умножение значения последствий для каждого случая на вероятность его возникновения и суммирование (или интегрирование) всех этих произведений по полному пространству событий. Эта операция фактически соизмеряет неблагоприятные события с тяжелыми по-

следствиями и низкими вероятностями появления, с одной стороны, с событиями с незначительными последствий и высокими вероятностями появления, с другой [2]. В этом разделе рассмотрим неправильное употребление, неверное истолкование и обманчивость ожидаемых величин, когда они используются как единственный критерий риска при принятии решения. Все большее число специалистов приходит к мысли о серьезных ограничениях концепции ожидаемой величины, расширяя эту концепцию дополнительной мерой *условного ожидания*. При этом решения о чрезвычайных и катастрофических событиях не усредняются с наиболее часто встречающимися событиями «высокая частота – низкие последствия».

Риск чрезвычайных событий

Перед лицом таких непредвиденных бедствий как прорывы дамб, падение мостов и катастрофы самолетов, мы должны признать важность изучения "чрезвычайных" событий. Современные ЛПР больше не задают вопросы об ожидаемом риске; вместо этого, они задают вопросы об ожидаемом катастрофическом или недопустимом риске. Эти аналитики сосредоточивают усилия на формировании более здравой оценки чрезвычайных событий как в теоретическом, так и в практическом смысле. Кроме того, менеджеры и лица, принимающие решение, больше всего заинтересованы в рассмотрении риска, связанного с определенными рассматриваемыми случаями, а не с вероятностью средних неблагоприятных результатов, которые могут быть связаны с различными опасными ситуациями. В этом смысле ожидаемая величина риска, которая до настоящего времени имеет доминирующее значение в анализе риска, не только неадекватна, но и может приводить к ошибочным результатам и интерпретациям. Люди, как правило, больше обеспокоены катастрофическими событиями с низкой вероятностью, чем часто встречающимися, но менее серьезными несчастными случаями. В некоторых ситуациях незначительное перераспределение имеющихся средств может иметь очень небольшой эффект для безусловного ожидаемого риска, но приводить к существенным изменениям для условного ожидаемого экстремального риска. Следова-

тельно, условный ожидаемый экстремальный риск может быть существенным фактором при рассмотрении проблем риска.

Два сложных вопроса – что такое достаточная безопасность, и что такое приемлемый риск? – подчеркивают нормативную основу в принятии решений на базе риска. На сегодняшний день отсутствует математическая, эмпирическая база знаний, которая могла бы адекватно моделировать восприятие рисков при принятии решений. В этой связи актуально рассмотрение вопросов, связанных с принятием решений при наличии нескольких критериев. В случае многокритериальной оптимизации (МКО) понятие оптимальности заменяется понятием недоминируемости. И если в случае однокритериальной задачи решение есть точка оптимума, в многокритериальной задаче оно дает множество эффективных (оптимальных по Парето) альтернатив. Во многих ситуациях процесс принятия решений, учитывающих риски, может и должен рассматриваться как разновидность многокритериальной оптимизации, в которой некоторые критерии (целевые функции) есть функции риска.

Стоит отметить, что есть два подхода к рассмотрению принятия решений при наличии риска в рамках многокритериальных задач. Первый рассматривает риск (например, прорыва дамбы) как целевую функцию, которая заменяет функции стоимости и выгоды. Второй подход касается трактовки ущербов различной величины и различных вероятностей его возникновения как несоответствующих (несоразмерных) цели, которые таким образом должны быть усилены введением функций риска (например, условной ожидаемой функции). Пожалуй, самый важный аспект рассмотрения принятия решения с учетом риска в рамках МКО – корректная обработка экстремальных событий.

Существует различие между количественным определением риска, который является эмпирическим процессом, и определением безопасности, являющимся нормативным процессом. В обоих этих процессах существенна роль аналитика, осуществляющего оценку и управление риском.

Главная проблема для лица, принимающего решение – перегрузка информацией: для каждой выбранной стратегии (действия или меры) существует обширное множество потенциальных убытков, так же как выгод и затрат с соответствующими им вероятно-

стями. Именно на этой стадии большинство аналитиков попадает в ловушку анализа, использующего ожидаемые величины. Чтобы защитить ЛПР от информационной перегрузки, аналитики предварительно соизмеряют катастрофические убытки, которые имеют низкую вероятность возникновения, с незначительными убытками, которые имеют высокую вероятность появления. Очевидно, что катастрофический прорыв дамбы, следствием чего может стать затопление, скажем, 10^5 акров земли с соответствующим ущербом для человеческих жизней и окружающей среды, но который имеет очень низкую вероятность появления (например, 10^{-5}), не должен рассматриваться ЛПР так же, как затопление 10^2 акров с высокой вероятностью 10^{-2}, хотя оба события имеют одинаковую ожидаемую функцию риска. Сопоставление низковероятностного, но с высоким ущербом события с событием с высокой вероятностью появления и низким ущербом в рамках одной и той же ожидаемой функции риска (некоей разновидности функции полезности) заметно искажает относительную важность этих событий и их последствий.

Ошибочность ожидаемых величин

Один из наиболее важных шагов в процессе оценки риска – количественное его определение. В качестве меры риска используют, как правило, его ожидаемую величину. Фактически, она не получила того всестороннего профессионального исследования, которого заслуживает. Условная ожидаемая величина риска экстремальных событий в рамках раздельного многокритериального метода оценки риска (РММОР) – одно из немногих исключений [2].

Пусть $p_x(x)$ обозначает функцию плотности вероятности (ФПВ) случайной переменной X, где X концентрация загрязнителя в грунтовой воде, измеренная в частицах на миллиард (ч·млрд). Ожидаемая величина концентрации загрязнителя (риск того, что грунтовая вода загрязнится средней концентрацией загрязнителя), есть $E(X)$ ч·млрд. Если функция плотности вероятности является дискретной по n регионам в полном пространстве концентраций загрязнителя, тогда $E(X)$ равняется сумме произведений p_i и x_i, где p_i - вероятность того, что i-ый компонент вероятности имеет концентрацию загрязнителя x_i. В случае непрерывной переменной вместо сумми-

рования используется интегрирование. Отметим, что использование ожидаемой величины делает соизмеримыми события с низкой концентрацией загрязнителя и высокой частотой и события с высокой концентрацией загрязнителя и низкой частотой. Например, события x_1 = 2 ч·млрд и x_2 = 20 000 ч·млрд, которые имеют вероятности p_1 = 0.1 и p_2 = 0.00001, соответственно, дают тот же самый вклад в полную ожидаемую величину: (0.1) (2) + (0.00001) (20 000) = 0.2 + 0.2. Однако, для ЛПР ситуация с относительно низкой вероятностью катастрофических загрязнений грунтовой воды при концентрации загрязнителя 20000 ч·млрд не может быть эквивалентна ситуации с загрязнением при низкой концентрации 2 ч·млрд даже при очень высокой вероятности такого загрязнения. Из-за характера математического сглаживания, использование усредненной функции концентрации загрязнителя в этом примере не может служить разумной основой для принятия решений. Это является следствием того, что ожидаемый риск не вычленяет катастрофические события и их последствия, искажая, представляя в ложном свете то, что должно было быть воспринято как недопустимый риск.

Стоит отметить, что на практике большое число принятых "хороших" решений не может служить оправданием даже небольшого числа решений, которые привели к бедственным последствиям. Поэтому ожидаемый риск не может служить мерой, которая адекватно описывает ситуацию. Условная ожидаемая величина риска экстремальных событий, полученная с использованием РММОР совместно с (безусловной) ожидаемой величиной, может внести заметный вклад в решение задачи управления риском. В этот случае ЛПР должно пойти на компромисс не только между стоимостью предотвращения загрязнения грунтовой воды и ожидаемой величиной риска такого загрязнения, но также и между стоимостью предотвращения и условной ожидаемый величиной экстремального загрязнения. Такой двоякий многокритериальный анализ обеспечивает ЛПР более полной, более всесторонней и менее агрегированной информацией обо всех возможных вариантах и компромиссах.

Подход, использующий величину ожидаемого значения, аналогичен в некоторых смысле выражению (агрегированию) всех выгод и затрат в единой шкале – шкале денежных единиц. Действительно,

вряд ли целесообразно рассматривать анализ «затраты – выгода», где все выгоды, затраты и риски выражены в денежных единицах, как адекватную и приемлемую меру для принятия решения, когда она используется как единственный критерий выбора. Альтернативным подходом в этом смысле может стать многокритериальный анализ.

Чтобы продемонстрировать ограничения, присущие анализу «затраты – выгода», рассмотрим проблему проектирования с четырьмя варианта (альтернативами) проекта [2]. Учитываются следующие критерии: стоимость, средняя частота отказов (то есть ожидаемая величина отказов для нормально распределенной функции плотности вероятности отказов) и стандартное отклонение (табл. 2.20). Рис. 2.20 изображает нормально распределенные функции плотности вероятности отказов для каждого из четырех вариантов. На основании только ожидаемых затрат, предпочтительным является выбор четвертого варианта проекта, как имеющего наименьшую стоимость (40 000 $). Однако анализ вариаций, которые служат индикатором экстремальных отказов, показывает, что этот выбор, в конце концов, может не быть наилучшим; и это приводит к необходимости более глубокого альтернативного анализа.

2.11.2. Многокритериальный анализ риска

РММОР выделяет множество диапазонов повреждений (определяя так называемые частичные вероятности) и генерирует условные ожидания ущерба при условии, что ущерб попадает в пределы индивидуального диапазона. А *условное ожидание* определено как ожидаемое значение случайной переменной, учитывая, что это значение находится в пределах некоторого предварительно заданного диапазона вероятностей. Ясно, что значения условных ожиданий зависят от разбиения оси вероятностей. Вариант разбиения выбирается субъективно в зависимости от экстремальных характеристик проблемы принятия решения. Например, если ЛПР предполагает анализировать катастрофы, происходящие "раз в миллион лет", разбиение нужно выбирать для акцентирования ожидаемого катастрофического риска.

Таблица 2.20

Варианты данных и результаты

Номер варианта	Стоимость, $	Средняя ожидаемая величина *m*	Стандартное отклонение *s*
1	100 000	5	1
2	80 000	5	2
3	60 000	5	3
4	40 000	5	4

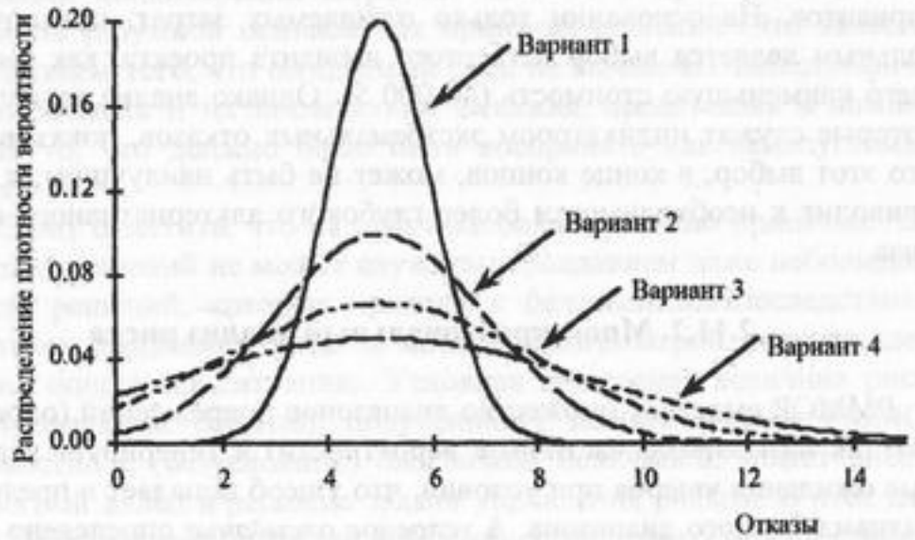


Рис. 2.20. Четыре варианта плотности вероятности отказов

Окончательная цель эффективной оценки риска и управления состоит в том, чтобы предложить некоторые приемлемые и теоретически обоснованные принципы выбора распределений вероятностей. Эти принципы выбора распределений вероятностей должны помочь включать значащие критерии решения, точные оценки риска, а также воспроизводимые и убедительные исследования. Так как эти оценки риска часто привязаны к очень редким катастрофическим событиям, необходимо чтобы руководящие принципы основывались на статистике чрезвычайных событий в выборе распределений вероятностей.

Существует разнообразная литература, которая рассматривает методы аппроксимации распределений вероятностей из эмпирических данных. Для оценки параметров распределений можно использовать, например, метод моментов или метод максимума функции отклика. Как правило, при описании природных катаклизмов и экологических сценариев используют "чистые" распределения. Проблема заключается в том, что для природных опасностей оценки и решения основываются на худших сценариях, соответствующих «хвостам» распределений. Различия в них могут быть очень существенны, даже если параметры, которые характеризуют центральные части распределения, подобны. Нормальное и равномерное распределения, которые имеют подобные ожидаемые значения, могут заметно отличаться на хвостах. Возможность значительного искажения потенциально самой важной части распределения, хвостов, выдвигает на первый план задачу выбора распределений вероятностей при рассмотрении чрезвычайные событий. В этой связи необходимо приложить все усилия чтобы, наряду с моделированием полного распределения, охарактеризовать хвосты распределений. Улучшенное соответствие между экстремальным событием и хвостами распределений обеспечивает ЛПР более точной и значимой информацией. Главные факторы, которые необходимо учесть при этом:

- пригодность данных,
- характеристики «хвостов» распределений (такие, как форма и быстрота спада),
- дополнительная информация.

РММОР – метод анализа риска, развитый для решения многокритериальных задач вероятностного характера. Вместо того чтобы использовать традиционную ожидаемую величину риска, РММОР генерирует набор условных значений функций ("функций риска"), которые представляют риск, соответствующий определенному

диапазону вероятностей появления неблагоприятного события. В противоположность методу, где задачи, по крайней мере с одной случайной переменной, решаются путем вычисления безусловного ожидаемого значения, представляющего неблагоприятное событие, PMMOP выделяет набор диапазонов неблагоприятных событий, определяя так называемые частичные вероятности, и генерирует условное ожидание неблагоприятного события при условии, что неблагоприятное событие находится в пределах соответствующего диапазона. Подобным образом PMMOP порождает набор функций риска, одну для каждого диапазона, которые затем пополняют оптимизационную проблему как новые целевые функции.

Условные математические ожидания находят, разделяя ось вероятностей и отображая это разделение на ось ущерба. Соответственно, ось ущерба также оказывается разделенной на соответствующие диапазоны. А *условное математическое ожидание определяется как ожидаемое значение случайной переменной, причем это значение находится в пределах некоторого предварительно заданного диапазона вероятностей.* Понятно, что значения условных математических ожиданий зависят от того, как разделена ось вероятностей. Выбор варианта разделения этой оси определяется субъективно аналитиком в зависимости от характера экстремальных характеристик проблемы. Если, например, аналитик рассматривает катастрофу "раз в миллион лет", разделение должно быть таким, чтобы был акцентирован ожидаемый катастрофический риск. Хотя общее правило подобного разделения отсутствует, предлагается в случае нормального распределения вероятностей при выборе трех диапазонов ущерба в качестве разделяющих значений дисперсий выбрать +1*s* и +4*s*. Эти значения соответствуют разделению оси вероятностей в 0.84 и 0.99968, т.е. диапазон незначительного ущерба будет содержать 84 % событий, промежуточный диапазон будет содержать только 16 %, а диапазон катастрофического ущерба будет содержать приблизительно 0.032 % (вероятность 0.00032). В литературе к событиям катастрофического характера обычно относят события с вероятностью появления 10^{-5}. Эта вероятность соответствует событиям, выходящим за пределы +4s.

Непрерывная случайная переменная повреждений имеет интегральную функцию распределения (ИФР) *P(x),* и функцию плотности вероятности (ФПВ) *p(x),* которые определяются соотношениями:

$$P(x) = \text{Prob}[X \le x], \tag{2.46}$$

и

$$p(x) = \frac{dP(x)}{dx}. \tag{2.47}$$

ИФР представляет *вероятность непревышения x. Вероятность превышения x* определяется как вероятность того, что X будет больше, чем x и равен единице минус ИФР.

Ожидаемое значение, среднее, или среднее значение случайной переменной X определяется как

$$E[X] = \int_0^\infty xp(x)dx. \tag{2.48}$$

Для дискретного случая, где пространство событий случайной переменной X дискретно в I сегментах, ожидаемая величина ущерба $E[X]$ может быть записана как:

$$E[X] = \sum_{i=1}^{I} p_i x_i, \tag{2.49}$$

$$p_i \ge 0, \tag{2.50}$$

$$\sum p_i = 1, \tag{2.51}$$

где x_i есть i-ый сегмент ущерба.

В РММОР концепция ожидаемой величины ущерба расширена на составные *условные функции ожидаемых величин,* каждая из которых связана со специфическим диапазоном вероятностей превышения или соответствующего диапазона серьезности ущерба. Результирующие условные функции ожидаемых величин в соединении с традиционной ожидаемой величиной предоставляют семейство мер риска, связанных с конкретной стратегией.

Предположим, что величина ущерба, связанная с вариантом управления (контроля) s_j, $j \in \{1,...,q\}$ может быть представлена непрерывной случайной переменной X, где $p_x(x;s_j)$ и $P_X(x;s_j)$ обозначают ФПВ и ИФР ущерба соответственно. Две частичные вероятности α_i $(i=1, 2)$ определяют три диапазона величин ущерба для каждого варианта управления s_j. Ущерб β_{ij}, соответствующий вероятность превышения $(1 - \alpha_i)$, может быть определен с использованием $P_X(x;s_j)$. Вариант управления s_j, границы α_i и пределы β_{ij} диапазонов ущербов связаны уравнением

$$P_X(\beta_{ij};s_j) = \alpha_i, \quad i = 1,2, \forall j, \tag{2.52}$$

где P_x – интегральная функция распределения X.

РММОР делит ось вероятностей на три диапазона. Значения β_{ij} (с β_{0j} и β_{3j} представляющими, соответственно, нижнюю и верхнюю границы ущерба) определяют условное ожидание как

$$f_i(s_j) = E[X | p_x(x;s_j), X \in [\beta_{i-2,j}, \beta_{i-1,j}]], \quad i = 2,3,4; j = 1,..q, \tag{2.53}$$

или

$$f_i(s_j) = \frac{\int_{\beta_{i-2,j}}^{\beta_{i-1,j}} x p_x(x;s_j)dx}{\int_{\beta_{i-2,j}}^{\beta_{i-1,j}} p_x(x;s_j)dx}, \quad i = 2,3,4; j = 1,..q, \tag{2.54}$$

где f_2, f_3 и f_4 представляют, соответственно, риск с высокой вероятностью превышения и низким ущербом; риск со средней вероятностью превышения и средним ущербом и риск с низкой вероятностью превышения и высоким ущербом.

Безусловная (обычная) ожидаемая величина X обозначена как $f_5(s_j)$. Соотношение между условными ожидаемыми величинами (f_2, f_3 и f_4) и безусловной ожидаемой величиной (f_5) записывается как

$$f_5(s_j) = \theta_2 f_2(s_j) + \theta_3 f_3(s_j) + \theta_4 f_4(s_j), \tag{2.55}$$

где θ_i (i=2,3,4) – числовой множитель. Из определения β_{ij} следует, что $\theta_i \geq 0$ константа и $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 1$. θ_i независимы от варианта управления и представляют собой вероятности того, что X реализуется в каждом их трех диапазонов ущерба. Множители θ_i определяются из уравнений:

$$\theta_2 = \int_0^{\beta_{1j}} p_x(x;s_j)dx, \tag{2.56}$$

$$\theta_3 = \int_{\beta_{1j}}^{\beta_{2j}} p_x(x;s_j)dx, \tag{2.57}$$

$$\theta_4 = \int_{\beta_{2j}}^{\infty} p_x(x;s_j)dx. \tag{2.58}$$

Комбинируя условные ожидаемые функции риска или безусловную ожидаемую функцию риска с целевой функцией стоимости f_1, получаем набор для многокритериальной проблемы оптимизации:

$$\min [f_1, f_i]^t, \ i=2, 3, 4, 5, \tag{2.59}$$

где индекс t обозначает оператор транспонирования.

Это представление дает больше информации о вероятностном поведении системы, чем единственная многокритериальная формулировка $\min[f_1, f_5]^t$. Компромисс между функцией стоимости f_1 и любой функцией риска $f_i (i \in \{2,3,4,5\})$ позволяют ЛПР рассматривать граничную стоимость небольшого сокращения целевой функции риска, учитывая специфический уровень риска для каждой из областей риска и заданную безусловную функцию риска. Соотношение между функцией стоимости и различными функциями риска дают:

$$1/\lambda_{15} = \theta_2/\lambda_{12} + \theta_3/\lambda_{13} + \theta_4/\lambda_{14}, \qquad (2.60)$$

где

$$\lambda_{1i} = -\partial f_1/\partial f_i. \quad i = 2,3,4,5. \qquad (2.61)$$

Знание этих отношений и граничных затрат обеспечивают ЛПР информацией, которая является полезной для определения приемлемого уровня риска.

Рассмотрим пример, позволяющий графически представить некоторые из обсуждавшихся параметров. Пусть $1-\alpha_1$, и $1-\alpha_2$, где $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < 1$, обозначают вероятности превышения, которые делят область X на три диапазона следующим образом. На графике рис. 2.21 значению β_1 на оси ущерба соответствует вероятность превышения $1-\alpha_1$ на оси вероятности. Точно так же значению β_2 соответствует вероятность превышения $1-\alpha_2$. Повреждения меньшие, чем β_1 рассматриваются как повреждения с низким ущербом, а повреждения большие, чем β_2 – как повреждения с высоким ущербом. Точно так же повреждения со значениями между β_1 и β_2 рассматриваются как имеющие средний ущерб. Если вероятность α_1 определена, например, как 0.05, тогда β_1 есть 5 % процентиль (нижняя квартиль). Точно так же, если α_2 есть 0.95 (т.е., $1-\alpha_2$ равна 0.05), тогда β_2 – 95 % процентиль (верхняя квартиль). Квартильный размах, являющийся показателем изменчивости, равен, по определе-

нию: верхняя квартиль минус нижняя квартиль. В данном случае квартильный размах представляет собой интервал вокруг медианы, содержащий 90 % событий.

На рис. 2.21 для каждого из трех диапазонов условное ожидаемый ущерб задает меру риска, связанного с диапазоном.

Рис. 2.21. Функция плотности вероятностей распределений частоты отказов

Эти меры получены посредством определения *условной ожидаемой величины*:

$$f_2(\cdot) = E[X \mid X \le \beta_1] = \frac{\int_0^{\beta_1} xp(x)dx}{\int_0^{\beta_1} p(x)dx}. \qquad (2.62)$$

Аналогично, для функции $f_3(.)$:

$$f_3(\cdot) = E[X|\beta_1 \le X \le \beta_2] = \frac{\int_{\beta_1}^{\beta_2} xp(x)dx}{\int_{\beta_1}^{\beta_2} p(x)dx}, \qquad (2.63)$$

и для $f_4(.)$

$$f_4(\cdot) = E[X|X > \beta_2] = \frac{\int_{\beta_2}^{\infty} xp(x)dx}{\int_{\beta_2}^{\infty} p(x)dx}. \qquad (2.64)$$

Таким образом, есть три меры риска $f_2(.)$, $f_3(.)$ и $f_4(.)$ в дополнение к традиционной ожидаемой величине, обозначаемой $f_5(.)$, а $f_1(.)$ зарезервирована для управления риском. Отметим что

$$f_5(\cdot) = \frac{\int_0^{\infty} xp(x)dx}{\int_0^{\infty} p(x)dx} = \int_0^{\infty} xp(x)dx, \qquad (2.65)$$

так как полная вероятность в пространстве событий X равна единице. В РММОР все меры или некоторый набор из этих пяти мер сбалансированы в многокритериальной формулировке.

Эта схема разделения проиллюстрирована на рис. 2.22 для двух гипотетических вариантов решений s_1 и s_2.

Выше описано разделение фиксированными вероятностями α_i, i=1, 2 на три диапазона ущерба. В качестве альтернативы РММОР предусматривает разделение диапазонов ущерба заданными порогами ущерба. Например, значение $f_4(s_j)$ в разделении фиксированным ущербом становится ожидаемым ущербом вследствие решения j, учитывая, что ущерб превышает установленную величину.

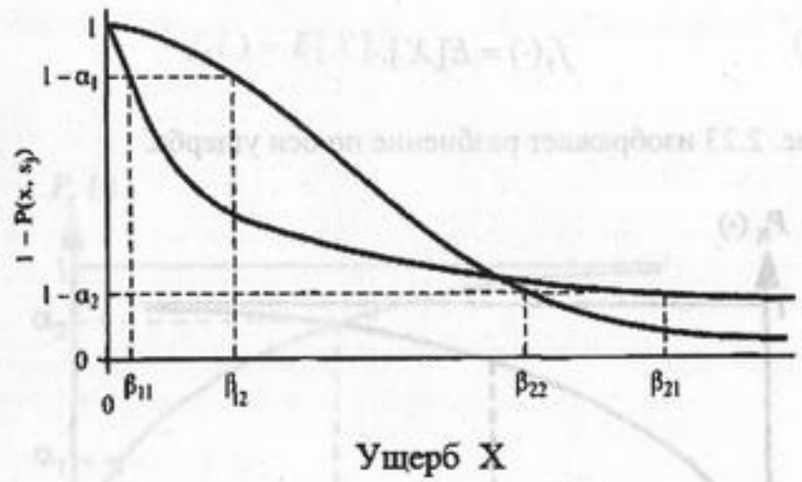


Рис. 2.22. Отображение разделения вероятностей для двух вариантов решений

В итоге, условные функции ожидаемых величин в РММОР являются мерами риска, связанными с определенным диапазоном тяжести ущерба. Напротив, традиционно понимаемые риски, базирующиеся на понятиях ожидаемых величин, для всех диапазонов тяжести ущерба представляют только главную тенденцию ущерба.

Проведем сравнение разбиения по оси ущерба с разбиением по оси вероятностей. Уравнения (2.66) - (2.68) представляют собой функции риска – меры условных ожидаемых значений $f_2(.)$, $f_3(.)$ и $f_4(.)$ – случайной переменной, которая характеризует ущерб. Уравнение (2.69) представляет безусловное ожидаемое значение функции $f_5(.)$:

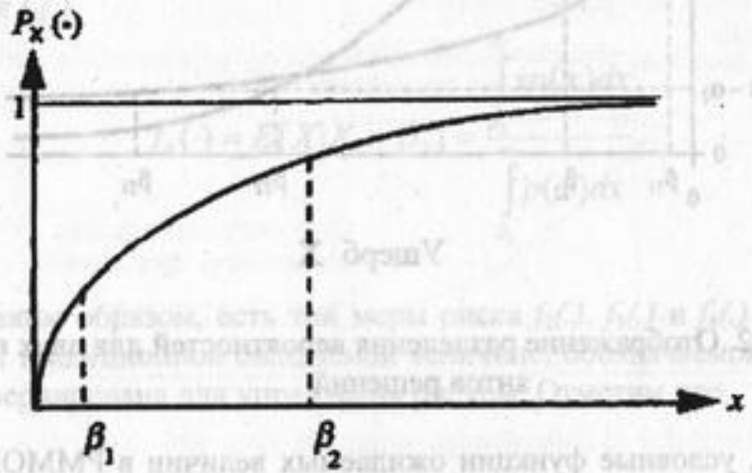
$$f_2(\cdot) = E[X|X \le \beta_1], \qquad (2.66)$$

$$f_3(\cdot) = E[X|\beta_1 \le X \le \beta_2], \qquad (2.67)$$

$$f_4(\cdot) = E[X \mid X > \beta_2], \tag{2.68}$$

$$f_5(\cdot) = E[X]. \tag{2.69}$$

Рис. 2.23 изображает разбиение по оси ущерба.



Неблагоприятный исход

Рис. 2.23. Разбиение по оси ущерба

Параллельно с разбиением по оси ущерба, уравнения (2.70) - (2.72) представляют меры тех же самых условных ожидаемых значений с разбиение по оси вероятностей. Подобно уравнению (2.69), уравнение (2.73) представляет безусловное ожидаемое значение функции $f_5(.)$.

Рис. 2.24 изображает разбиение по оси вероятности.

$$f_2(\cdot) = E[X \mid X \le P^{-1}(\alpha_1)], \tag{2.70}$$

$$f_3(\cdot) = E[X \mid P^{-1}(\alpha_1) < X \le P^{-1}(\alpha_2)], \tag{2.71}$$

$$f_4(\cdot) = E[X \mid X > P^{-1}(\alpha_2)], \tag{2.72}$$

$$f_5(\cdot) = E[X]. \tag{2.73}$$

Неблагоприятный исход

Рис. 2.24. Разбиение по оси вероятностей

Для лучшего понимания двух схем разбиения и их применения табл. 2.21 обобщает их. Рис. 2.25 изображает разбиение вероятностей превышения [1 - $P_x(X)$] на ось вероятностей. По оси абсцисс отложены значения ущерба. Следует отметить, что знаменатель условного ожидаемого значения функции (см. 4 в табл. 2.21) остается постоянным для различных вариантов сценариев (решений) s_j (см. уравнение (2.74)):

$$\int_{\beta_{1,j}}^{\beta_{2,j}} p_x(x; s_j)dx = (1-\alpha_1) - (1-\alpha_2) = \alpha_2 - \alpha_1. \tag{2.74}$$

Таблица 2.21

Сравнение РММОР с разделением по осям ущерба и вероятностей

Разбиение оси ущерба (рис. 2.27)	Разбиение оси вероятностей и проектирование на ось ущерба (рис. 2.26)
Шаг:	Шаг:
1. Определение вероятности превышения $1\text{-}P_x(\cdot)$	1. Определение вероятности превышения $1\text{-}P_x(\cdot)$
2. Разбиение оси ущерба: $[\beta_i,\beta_{i-1}]$, $i=1, 2, \ldots,N$	2. Разбиение оси вероятностей: $[1\text{-}\alpha_i,1\text{-}\alpha_{i-1}]$, $i=1, 2, \ldots,N$
3. Не применимо	3. Отображение разбиения оси вероятностей на ось ущерба для каждого сценария s_j: $[\beta_i,\beta_{i-1}]$, $i=1, 2, \ldots,N$, где $\beta_{i,j}=P_x^{-1}(1-\alpha_i)$ $\beta_{i+1,j}=P_x^{-1}(1-\alpha_{i+1})$
4. Вычисление условных ожиданий $E[X\mid\beta_i<X\le\beta_{i+1}]=\frac{\int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}}xp_x(x;s_j)dx}{\int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}}p_x(x;s_j)dx}$	4. Вычисление условных ожиданий $E[X\mid\beta_{i,j}<X\le\beta_{i+1,j}]=\frac{\int_{\beta_{i,j}}^{\beta_{i+1,j}}xp_x(x;s_j)dx}{\int_{\beta_{i,j}}^{\beta_{i+1,j}}p_x(x;s_j)dx}$

Аналогично, рис.2.26 показывает отображение разделений оси вероятностей превышения ($1\text{-}P_x(X)$) на ось ущерба для двух стратегий s_1 и s_2. Знаменатели условных ожидаемых значений функций (шаг 4 в табл. 2.21) различны для различных сценариев s_j. Обращаем внимание, что проекции разбиений ущерба на ось вероятностей не те же самые. В итоге, в разделении вероятностей превышения на ось ущерба в знаменателе используются различные коэффициенты для различных сценариев s_j, в то время как области ущерба остаются те же самые.

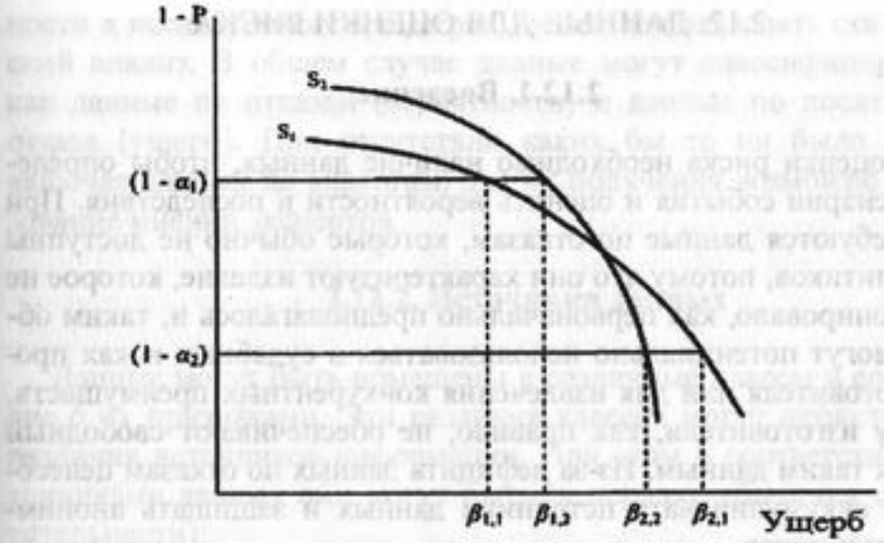


Рис. 2.25. Отображение разделений оси вероятностей превышения на ось ущерба для двух стратегий s_1 и s_2

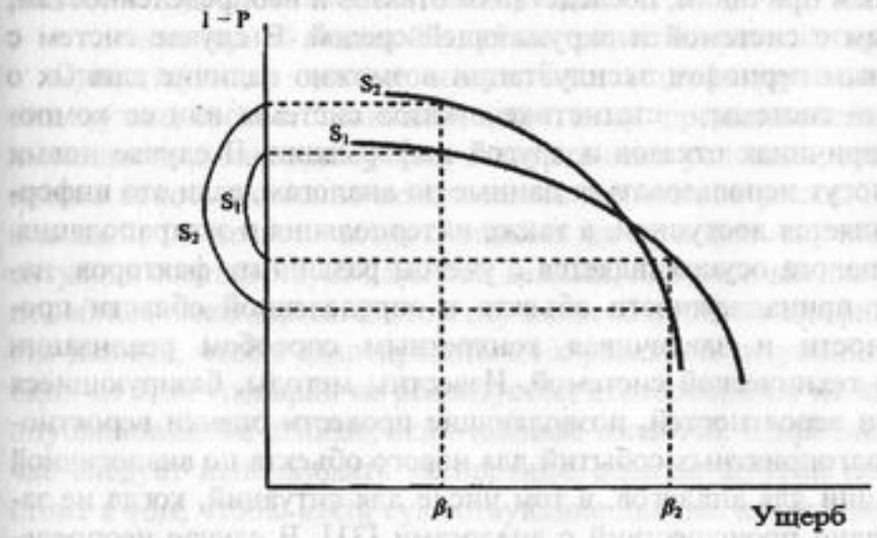


Рис. 2.26. Отображение разделений оси вероятностей превышения на ось ущерба для двух стратегий s_1 и s_2

2.12. ДАННЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА

2.12.1. Введение

Для оценки риска необходимо наличие данных, чтобы определить сценарии события и оценить вероятности и последствия. При этом требуются данные по отказам, которые обычно не доступны для аналитиков, потому что они характеризуют изделие, которое не функционировало, как первоначально предполагалось и, таким образом, могут потенциально использоваться в судебных исках против изготовителя или для извлечения конкурентных преимуществ. Поэтому изготовители, как правило, не обеспечивают свободный доступ к таким данным. Из-за дефицита данных по отказам целесообразно аккумулировать источники данных и защищать анонимность источников.

Чтобы провести количественную оценку риска или качественную оценку риска, необходима соответствующая информация. Информация для оценки риска может включать данные по возможным отказам, вероятностям отказов, частоте отказов, режимам отказов, возможным причинам, последствиям отказов и неопределенностям, связанным с системой и окружающей средой. В случае систем с длительным периодом эксплуатации возможно наличие данных о «истории» системы – статистике отказов системы или ее компонентов, причинах отказов и другой информации. В случае новых систем могут использоваться данные по аналогам, если эта информация является доступной, а также интерполяция и экстраполяция. Выбор аналога осуществляется с учетом различных факторов, начиная от принадлежности объекта к определенной области промышленности и заканчивая конкретным способом реализации функций технической системой. Известны методы, базирующиеся на теории вероятностей, позволяющие провести оценки вероятностей неблагоприятных событий для нового объекта по аналогичной информации для аналогов, в том числе для ситуаций, когда не зафиксировано происшествий с аналогами [31]. В случае неопределенностей нечеткой природы можно использовать оценки, основанные на теории возможностей [32].

Сбор имеющейся информации – обычный способ получения данных. Чтобы оценить доверительные интервалы и неопределенности в исследуемых параметрах, можно использовать статистический анализ. В общем случае данные могут классифицироваться как данные по отказам (вероятности) и данные по последствиям отказа (ущерб). При отсутствии каких бы то ни было данных, включая данных по аналогам, для их получения возможно использование мнений экспертов.

2.12.2. Источники данных

Данные могут быть помещены в различные классы в соответствие с их признаками. Эти различия классов могут проистекать из различия источников информации. При этом в соответствии с источниками данных они могут быть (в порядке убывания предпочтительности):

- актуарными – реальные данные из экспериментов с идентичными (или подобными) объектами в идентичных условиях применения;
- опубликованными – реальные данные, опубликованные для подобных объектов в идентичных условиях;
- инженерной оценкой – субъективное мнение экспертов.

Существующие данные могут быть модифицированы, чтобы они лучше соответствовали конкретному предназначению. Если имеющиеся данные получены в идентичных условиях, эти данные можно непосредственно использовать для оценок риска. Это оптимальный, но нечасто встречающийся на практике случай. Другая ситуация соответствует наличию данных, полученных для условий, подобных имеющимся. В этом случае необходимо модифицировать эти данные, чтобы адаптировать их к реальной ситуации. Если ни один из этих сценарии не реализуется, целесообразно использовать опубликованные данные, если таковые имеются. В противном случае следует использовать экспертные оценки. Другой подход состоит в том, чтобы взять существующие данные для подобной системы, верифицированной при отличающихся условиях, и сравнить уровни нагрузок. Имеющиеся данные по частотам отказов необходимо скорректировать с учетом различия нагрузок. При этом могут

использоваться байесовские методы для комбинирования объективной и субъективной информации.

Общие (видовые) данные – данные, которые были получены для машин или систем, являющихся подобными, но не обязательно идентичными. Например, видовые данные по отказам насоса могут быть получены для различных типов насосов, используемых в различных системах, например, перекачки (газ, нефть, вода). Довольно часто, видовые данные – единственная доступная информация на начальных стадиях оценки риска, но использовать их необходимо с большой осторожностью, потому что они имеют общий характер. Подобная общая информация может применяться на начальных стадиях оценки риска, но для получения адекватных оценок необходимо использовать более специализированные данные.

Тщательный анализ риска должен базироваться на данных, которые являются адаптированными к данной системе, в отличие от видовых данных, используемых на стадиях предварительного анализа. Адаптированными данными могут быть данные, которые получены для идентичных систем и компонентов или для подобных систем. Данные по риску часто являются данными, имеющимися у производителя серийной продукции. В случае, когда оценки риска проводятся на стадии проектирования системы, подобные данные, как правило, отсутствуют, и анализ риска на этой стадии должен проводиться с использованием родовых данных. После начала выпуска продукции необходимо провести более тщательный анализ риска с использованием вновь полученных данных.

Данные по отказам для различных компонентов и систем обычно не доступны, и в этих случаях могут использоваться родовые данные по вероятностям отказов. В случае отсутствия подобных данных могут использоваться оценочные значения.

В качестве примера родовых данных могут служить данные для технических систем, составной частью которых являются данные для атомных электростанций [33].

Базы данных

Базы данных могут классифицироваться согласно типам и источникам содержащейся в них информации, например, они могут быть идентифицированы как базы данных по авариям, если они

содержат информацию о вероятностях отказов, и последствиям. База данных может быть идентифицирована как внутренняя база данных, база данных предприятия, база данных процесса или отраслевая база данных, в зависимости от источника и рамок информации. Статистические данные по отказам, имеющиеся в литературе, могут использоваться для оценки риска конкретной системы после тщательного их исследования на предмет применимости. Пример исследования приемлемости подобных данных рассмотрен в [34].

В значительной части литературных источников отсутствует конкретная информация по отказам с приведением численных значений, например частоты отказов. Отсутствие стандартизированной регистрации данных и методологии их получения ведут к необходимости интерпретации этих значений. Например, если приведено среднее значение частоты отказов, вопросов, как правило, не возникает (хотя известно, что медиана, зачастую, является более представительной оценкой). Если же приведен диапазон значений, его необходимо интерпретировать на предмет того, экстремальные ли это значения параметра, или приведен доверительный интервал, и если да, то каков доверительный уровень. Некоторые источники могут приводить соответствующие функции распределения вероятностей параметра типа нормального или логнормального, в то время как другие источники приводят только стандартное отклонение. Сами методы представления информации по отказам зачастую не стандартизированы. Например, если данные используются для внутреннего потребления и не стандартизированы в соответствии с рекомендациями руководящих органов, формат их представления может значительно варьироваться для различных организаций. Зачастую имеющиеся данные затруднительно, а иногда и невозможно использовать, так как неизвестна представительность выборки, статистическая значимость, экспериментальные это данные или результат субъективного анализа экспертов и т.п. Без подобной информации данные не могут быть полностью и должным образом оценены.

Окружающая среда также может оказывать воздействие на причины и параметры отказов. Неучет этого обстоятельства может привести к тому, что пользователь будет использовать данные вне

их диапазона применимости, получая результаты, вводящие в заблуждение. Важен также способ представления системы. Например, систему перекачки жидкости можно представить в виде набора систем с различной степенью детализации. Соответственно, это будет влиять на результат анализа причин отказов.

2.12.3. Современные технологии анализа данных

В последнее время возросло понимание важности задач, связанных с анализом данных: хранением информации, оперативным и интеллектуальным ее анализом, в том числе с использованием современных технологий, таких как Data Mining.

Технология Data Mining (называется также как Knowledge Discovery In Data – обнаружение знаний в данных) исследует процесс нахождения новых полезных знаний в базах данных. Data Mining находится на пересечении различных наук, главными из которых являются системы баз данных, статистика и искусственный интеллект [35].

Все многообразие задач, решаемых с использованием Data Mining, по назначению можно условно разделить на описательные и предсказательные.

Описательные задачи основное внимание уделяют улучшению понимания анализируемых данных.

Предсказательные задачи позволяют на первом этапе на основании изучения набора данных с известными результатами построить модель. На втором этапе эта модель используется для предсказания результатов с использованием новых наборов данных.

Использование современных технологий анализа данных (где это возможно) призвано повысить адекватность данных для задач оценки риска.

2.12.4. Экспертные оценки

Все доступные данные должны использоваться, чтобы обеспечить количественное описание системы или компонентов системы. В случае новых систем, данные целесообразно получать интерполяцией или экстраполяцией существующей информации для подобных систем (аналогов) или данных для известных компонентов, которые входят в состав новой системы. В случае отсутствия известных аналогов может использоваться мнение экспертов.

Экспертом может быть очень квалифицированный человек со значительным опытом и знаниями в определенной области. Основные требования к эксперту, идентификация и выбор экспертов, а также другие вопросы, связанные с подготовкой и проведением экспертизы, приведены в [2].

Мнение эксперта может быть определено как эвристический процесс сбора информация или ответы на вопросы по конкретным проблемам в какой-либо области знаний. В контексте наших интересов речь должна идти о получении экспертным путем значений вероятностей происшествий (отказов) и последствий аварийных ситуаций (ущерба). Процесс получения экспертной информации может быть определен как формальный процесс получения информации или ответов на вопросы об определенных категориях, таких как частота отказов, последствия отказов и ожидаемое время до отказа. Мнение эксперта не должно противопоставляться точным значениям надежности (если они известны) и аналитическим методам оценки риска, но должно использоваться как дополнение и как подготовка к ним.

Комиссия по ядерному урегулированию США (Nuclear Regulatory Commission - NRC, 1997) классифицирует проблемы экспертного анализа на три степени сложности A, B и C (см. табл. 2.22) с четырьмя уровнями исследования I, II, III и IV, как показано в табл. 2.23.

Цель исследования и природа исследуемого явления или процесса определяют уровень исследования, как это представлено в табл. 2.22. При этом использование экспертных оценок позволяет подготовить количественную базу для выбора оптимального решения в сложных ситуациях. Однако следует иметь в виду, что надежность таких оценок зависит от информированности экспертов и возможности измерения этой информации при помощи различных шкал и показателей [36].

Таблица 2.22

Степени сложности проблемы

Степень сложности	Описание
A	Бесспорный, пренебрежимый риск
B	Значительная неопределенность, существенное разнообразие, спорный, сомнительный
C	Весьма спорный, существенный риск, очень сложный

Таблица 2.23

Уровни исследования

Уровень	Требования
I	Оценка модели, основанная на литературных данных и опыте работы и оценка необходимых величин
II	Оценка вариантов группой экспертов и оценка необходимых параметров
III	Расширенная группа экспертов путем обсуждения оценивает варианты и оценивает необходимые параметры
IV	Специалист организовывает группу эксперты, координирует их работу, направляет дебаты экспертов надлежащим образом, агрегирует мнения и оценивает необходимые параметры

Шкалы и показатели

Любая модель события или процесса является лишь неким приближением к реальности, которую она отражает. Причем соотношение между математической моделью и этими событиями или процессами тем лучше, чем в большей степени количественные и качественные характеристики этих событий или процессов поддаются измерению. В качестве измерения может пониматься процедура определения (качественного или количественного) значения величин с использованием какой-либо меры.

Для оценки качественных и количественных характеристик объектов (явлений) зачастую стремятся установить соотношения между объектами в виде чисел. Поэтому измерения в некотором смысле можно рассматривать как процесс установления соотношения между объектами или признаками объектов и числами из определенной числовой системы. В общем случае необходимо найти *меру*, позволяющую выразить соотношения между объектами или признаками объектов в виде чисел и/или показателей. При этом необходимо иметь в виду, что различные объекты и их признаки в разной степени поддаются измерениям. На способ же измерения оказывают влияние то, какая информация требуется, и необходимая точность информации. Так как основная задача измерений заключается в том, чтобы определить некоторую меру, которая даст возможность выявить соотношение между этой мерой и исследуемой величиной в виде, например, символов или чисел, разные способы измерения приводят к выбору различных правил задания соответствующих чисел. Эти правила определяют шкалы, тип которых зависит от характера операций, производимых с исследуемыми величинами.

Строго говоря, задача измерения свойств или признаков у объектов является непростой и имеет самостоятельное значение. Так, процесс измерения свойств может быть реализован в разных шкалах, каждая из которых характеризуется допустимым преобразованием данных. Поэтому в практике измерений используют различные типы шкал. Далее приведены основные типы шкал и их краткая характеристика.

- *Шкала наименований* (номинальная) является наиболее простой из всех шкал, может быть использована для установления эквивалентности элементов относительно рассматриваемого признака. При этом в процессе измерения некоторого признака объекту ставится в соответствие некоторый символ или число (номер), лишь отличающее одно значение признака от другого. Другими словами, символы или числа используются для установления принадлежности объекта к некоторому классу. Всем объекта одного и того же класса сопоставляется один и тот же символ или число, а объектам разных классов – разные символы или числа. Отношение

между объектами, лежащее в основе построения таких шкал является различием или тождеством. При этом основное правило в этих шкалах – не приписывать одного и того же символа (числа) разным классам или различных символов (чисел) одному и тому же классу. Допустимым преобразованием в шкалах наименований, не искажающим результатов измерений признаков в этой шкале, является взаимно однозначное соответствие между двумя множествами значений признаков. Частным случаем шкалы наименований является бинарная шкала, состоящая из двух элементов, обозначаемых произвольными символами, например: {+,-} или {0,1}. Примерами признаков, измеряемых в шкалах наименований, могут служить марка автомобиля, пол человека, названия объекта.

• *Порядковая шкала* или шкала порядка. В дополнение к различию объектов по значениям признаков устанавливает отношение порядка объектов относительно рассматриваемого признака. При этом признаку объекта ставится в соответствие, например, целое или натуральное число, которое можно интерпретировать как значение признака в баллах (отображения порядка, определенного на множестве объектов «меньше, чем», «больше, чем», «равно»). Говорят, что упорядоченные объекты ранжированы. Допустимым преобразованием, не искажающим результаты измерений признаков в шкалах порядка, является произвольное монотонно возрастающее отображение, или функция между двумя множествами значений признаков. Примерами признаков, измеряемых в порядковых шкалах, являются оценки на экзаменах, баллы за выступление в отдельных видах спорта. Подчеркнем, что в порядковых шкалах недопустимы арифметические операции.

• *Интервальная шкала* или шкала интервалов. В дополнение к порядку элементов по значениям признаков устанавливает равенство интервалов значений рассматриваемых признаков. Признаку объекта ставится в соответствие, как правило, действительное число, равное значению этого признака. Таким образом, числа здесь служат для отображения величины различий между свойствами объектов. Интервальные шкалы однозначны с точностью до линейного преобразования: $x_2 = ax_1 + b$, где $\{x_1\}$ набор измерений, $\{x_2\}$ преобразованный набор измерений, $a \neq 0$. Основное отношение, характерное для интервальной шкалы, – равенство интервалов или разностей. Примерами интервальных шкал являются температура в шкалах Фаренгейта и Цельсия, различные шкалы календарного времени, где переход из одной шкалы в другую осуществляется путем линейного преобразования.

• *Шкала отношений.* В дополнение к равенству интервалов по значениям признаков позволяет установить равенство отношений значений признаков. В процессе измерения признака объекту ставится в соответствие действительное число, равное значению этого признака. Таким образом, в шкалах отношений числа отображают отношения величин, и при использовании таких шкал речь идет об измерениях в общепринятом смысле этого слова. Перевод из одной шкалы отношений в другую осуществляется с использованием преобразования $x_2 = cx_1$, где $c>0$. Пример признаков, измеряемых в шкале отношений, – расстояние в футах и метрах. Характерным свойством этой шкалы является наличие абсолютного нуля.

Основное правило для установления типа шкалы – возможность преобразования числовых значений при сохранении неизменными выполняемых ею функций. Все типы шкал могут служить мерами, используемыми для оценки показателей исследуемых объектов. Однако мера и показатель – разные понятия. Часто вместо измерения значения, например, переменной X, которую измерить невозможно, измеряется переменная Y, связанная с X. В этом случае меру Y можно использовать как показатель X. Для подобных показателей характерно наличие дополнительного источника ошибок, который отсутствует в непосредственных измерениях.

Показатель в этом смысле есть средство передачи информации о данном объекте. В разных ситуациях от показателя требуется получение разных количеств информации. Используемые в практической деятельности показатели можно разделить на три группы.

• *Ассоциативные показатели* устанавливают только ассоциацию между объектами, принадлежащими двум различным совокупностям. В качестве правила для идентификации здесь используется шкала наименований.

• *Показатели очередности* определяют порядок расположения объектов в совокупности и показывают, какой из двух предметов расположен выше в принятом масштабе. Таким образом, показатель очередности несет в себе больше информации, чем ассоциативный показатель.

• *Показатели количества,* в свою очередь, несут в себе гораздо больше информации, чем ассоциативные и порядковые. Они позволяют предсказывать, исходя из наших знаний о свойствах объектов, что даст их сочетание.

Практическая полезность любого показателя определяется его способностью к выявлению существенных свойств объектов и связей в структуре моделей и удобством применения. Однако любой показатель имеет лишь вспомогательное значение и нужен лишь постольку, поскольку помогает провести анализ и выбрать оптимальный вариант решения.

При решении большинства проблем требуется учет многих показателей и критериев. Как правило, прежде всего, определяется набор объектов, подлежащих анализу, и вариантов решения проблемы – *альтернатив*. Выбор альтернатив осуществляется на основе *критериев* и *целей*.

В зависимости от природы исследуемых объектов и информации, необходимой для принятия решений, различают различные виды целей и критериев. Например, цели можно классифицировать как качественные и количественные. Альтернативы, в свою очередь, можно разделить на функциональные и операционные. Функциональные характеризуют разницу в виде (автомобиль и автобус как средства транспорта); операционные же характеризуют разницу в степени (различные конструкции автомобиля, обеспечивающие решение одной и той же задачи).

Выбор альтернатив может осуществляться, когда они количественно или качественно сравнимы. При этом поиск некоего «оптимального» решения зачастую осуществляют с использованием экспертов. Задача экспертов заключается в сравнении и оценке возможных альтернатив и выборе из них наиболее оптимальной (оптимальных в некотором смысле) по отношению к заданным критериям (целям).

Большие трудности при анализе, оценке и управлении риском связаны не только с недостатком надежных данных, но и с необходимостью разработки соответствующих моделей, корректной обработкой информации и принятием адекватных решений. При этом используются мнения экспертов в соответствующих областях. Возможен учет мнения одного эксперта или группы экспертов.

Идентификация и выбор группы экспертов

Размер группы экспертов должен быть определен на основании конкретной задачи. Группа должна быть достаточно большой, чтобы достигнуть требуемого разнообразия мнений, доверия к результатам экспертизы и надежности результатов. Для установления списка экспертов-кандидатов должны учитываться проведенные экспертизы, консультации с литературными источниками, техническими обществами, правительственными организациями и другими хорошо осведомленными экспертами. Процессы назначения и выбора должны соответствовать установленным критериям для назначения, выбора и удаления экспертов. Например, для выбора экспертов по сейсмическому анализу [2] использовались следующие критерии:

наличие опыта в данной проблеме и наличие публикаций;

знание различных аспектов, связанных с проблемой;

готовность предлагать варианты для обсуждения и быть беспристрастным оценщиком;

готовность затратить необходимое время и усилия для проведения экспертизы;

готовность эффективно участвовать в дебатах и обсуждениях для обеспечения получения необходимых оценок и интерпретаций;

коммуникабельность, гибкость и беспристрастность.

Группа экспертов для успешного проведения экспертизы должна быть сбалансирована по составу и иметь широкий спектр точек зрения.

Например, подобная группа может включать:

• сторонников, которые защищают конкретную гипотезу или техническое решение;

• оценщиков, которые рассматривают доступные данные, знакомятся с точками зрения оппонентов и других оценщиков, подвергают сомнению представленные данные и доводы оппонентов;

• эксперты, которые обладают детальными и глубокими знаниями в конкретной области, владеют методологиями оценки риска.

Эксперты должны быть знакомы с проектом, конструкцией, работой, обслуживанием, надежностью и техническими аспектами оборудования и его компонентами, а также спецификой проведения инспекций. Существенен выбор людей с базовыми инженерными или технологическими знаниями; однако, они не обязательно должны быть инженерами. Возможно, следует включить одного или двух экспертов в области управления со знанием оборудования и его компонентов, одного или двух экспертов с более широким знаниями оборудования и компонентов, а также, одного или двух экспертов со знаниями в области анализа риска и принятия решений с учетом риска и опытом их использования в областях, имеющих отношение к предмету экспертизы.

Наблюдатели могут быть приглашены участвовать в процессе экспертизы. Они могут участвовать в обсуждение, но не в формировании экспертного заключения. Причем состав и вклад наблюдателей существенен для успеха процесса экспертизы.

В состав наблюдателей могут входить:

• специалисты из научно-исследовательских лабораторий с опытом эксплуатации, разработки, исследований, или экономисты;

• специалисты в области вероятностного анализа.

Должна быть собрана информация о лидере экспертизы, помощнике, экспертах, наблюдателях и рецензентах. Все желающие могут участвовать в обсуждениях в течение встречи; однако только эксперты могут отвечать на вопросы по обсуждаемой проблеме.

Подготовка экспертизы, тренинг экспертов, подготовка анкет и составление вопросов к экспертам, выявление мнений экспертов, агрегирование мнений экспертов и другие аспекты экспертизы крайне важны для достижения целей экспертизы. Они представля-

ют отдельную задачу, выходящую за рамки нашего рассмотрения, от решения которой зависит корректность оценок риска и эффективность мер по управлению риском. Здесь же рассмотрим кратко некоторые аспекты проведения экспертизы.

Проведение экспертизы

При использовании экспертных методов оценки часто применяются порядковые шкалы. Например, при оценке ущерба вопрос сравнения может решаться по принципу «больше - меньше»; при оценке качества технического устройства – по принципу «хуже - лучше». Фактически речь идет об упорядочении объектов по набору признаков. При этом осуществляется попарное сравнение объектов друг с другом (ранжирование). В табл. 2.24 приведен пример ранжирования пяти объектов путем попарного сравнения одним экспертом. Предпочтение одного объекта перед другим обозначено единицей, обратная ситуация нулем.

Ранжированный ряд для объектов экспертизы имеет вид:

$$O4 < O5 < O5 < O1 < O3.$$

Таблица 2.24

Ранжирование пяти объектов путем попарного сравнения

Номер объекта	1	2	3	4	5	Итог
1	-	1	0	1	1	3
2	0	-	0	1	1	2
3	1	1	-	1	1	4
4	0	0	0	-	0	0
5	0	0	0	1	-	1

Для ранжирования можно использовать другие критерии, например, «преимущество» определять оценкой «1»; «меньше» или «хуже» – оценкой «-1», равенство – оценкой «0».

Можно использовать и группу из нескольких экспертов. При этом целесообразно провести тестирование, взаимооценку экспертов и проверку согласованности мнений.

Тестирование предполагает решение экспертами задач и сравнение полученных результатов с известными. Далее следует проверка по критериям (например, Фишера) на предмет принадлежности оценок разных экспертов к одной генеральной совокупности.

Самооценка состоит в том, что в ограниченное время каждый эксперт отвечает на вопросы специально составленной анкеты. В результате получают оценку в баллах. Согласованность мнения экспертов можно оценивать по величине коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}, \qquad (2.75)$$

где S – сумма квадратов отклонений оценок рангов каждого объекта от среднего значения, n – число экспертов, m – число объектов экспертизы.

Коэффициент конкордации изменяется в диапазоне $0<W<1$, 0 соответствует полной несогласованности, 1 – полному единодушию.

С увеличением числа экспертов качество экспертизы повышается. Количество экспертов, обеспечивающее заданную точность можно оценить, зная закон распределения мнений экспертов и максимально допустимую стандартную ошибку оценки S_x.

Минимальное количество экспертов n, обеспечивающее заданную точность, определяется формулой

$$n = \sqrt{\frac{S_x}{S_\Delta}}, \qquad (2.76)$$

где S_Δ – стандартное отклонение, определяемое по формуле

$$S_\Delta = \sqrt{[1/(m-1)]\sum_{i=1}^{m}(x_i - \bar{x})^2}, \qquad (2.77)$$

где $\bar{x}$ – среднеарифметическое значение оценок экспертов, m – число оценок, дававшихся экспертами.

Для упорядочения объектов можно использовать и шкалы, включающие число оценок больше двух и трех. Для примера в табл. 2.25 представлена шкала оценок важности, включающая значения от 1 до 9.

Таблиц 2.25

Шкала для определения матрицы сравнений

Оценка важности	Качественная оценка	Пояснения
1	Одинаковая значимость	Объекты (альтернативы) имеют одинаковый ранг
3	Слабое превосходство	Соображения о предпочтении одного объекта перед другим малоубедительны
5	Сильное (существенное) превосходство	Есть надежные данные о превосходстве одного объекта
7	Очевидное превосходство	Существуют убедительные свидетельства в пользу одного объекта
9	Абсолютное превосходство	Свидетельство в пользу предпочтения одного объекта перед другим в высшей степени убедительно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними оценками	Используются, когда необходим компромисс

Рассмотрим способ решения задачи упорядочения объектов по важности (весам) при заданной матрице отношений весов этих объектов.

Предположим, что имеется n объектов A_1, A_2, …, A_n, и пусть $w=(w_1, w_2, \ldots, w_n)$ – вектор относительных важностей (весов) этих

объектов, так что $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$. Предполагается, что результаты попарного сравнения объектов по весам описываются отношениями весов этих объектов. В этом случае результаты попарного сравнения объектов можно представить в форме матрицы A размером $n \times n$:

	A_1	A_2	...	A_n
A_1	w_1/w_1	w_1/w_2	...	w_1/w_n
A_2	w_2/w_1	w_2/w_2	...	w_2/w_n
...	...	...	...	...
A_n	w_n/w_1	w_n/w_2	...	w_n/w_n

Несложно показать, что матрица A обладает свойством

$$Aw = nw, \tag{2.78}$$

или

$$(A - n \cdot I)w = 0, \tag{2.79}$$

где I – единичная матрица, w – вектор относительных весов рассматриваемых объектов.

Допустим, что вектор весов w неизвестен, а известна только матрица A. Тогда для определения весов w по матрице A следует решить уравнение (2.79). Поскольку ранг матрицы A равен 1, то n – единственное собственное число этой матрицы, поэтому уравнение (2.79) имеет ненулевое решение. Более того, это решение единственное, обладающее свойством $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$. Это решение и есть искомый вектор относительных весов объектов.

Теперь допустим, что элементы a_{ij} матрицы A представляют собой не точные значения отношений весов объектов, а их оценки, представленные экспертами, причем по-прежнему выполнено соотношение $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Понятно, что для такой матрицы оценок, вообще говоря, не выполняется соотношение $a_{ij}\, a_{jk} = a_{ik}$, необходимое для существования нетривиального решения уравнения (2.79). Поэтому вместо этого уравнения нужно рассматривать более общее уравнение вида

$$(A - \lambda_{max} \cdot I)w = 0, \tag{2.80}$$

где λ_{max} – максимальное собственное число матрицы A ($\lambda_{max} \geq n$).

Учитывая сказанное, несложно понять, что матрица отражает согласованные суждения тогда и только тогда, когда $\lambda_{max} = n$. Причем, $(\lambda_{max} - n)$ представляет меру несогласованности. Сильное отличие λ_{max} от n указывает на внутреннюю несогласованность оценок экспертом значений матрицы A и о необходимости их уточнения, пересмотра. Если же значение λ_{max} достаточно близко к n, то нормированный к 1 вектор w – решение уравнения (2.80) – можно рассматривать в качестве приемлемой оценки относительных весов рассматриваемых объектов, восстановленных по матрице оценок A.

В следующей главе приведен метод и пример получения экспертных оценок в случае нечеткой исходной информации.

2.13. РИСК, СВЯЗАННЫЙ С ОБЛУЧЕНИЕМ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Для расчета вероятностных потерь и обоснования расходов на радиационную защиту при реализации принципа оптимизации принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе в **1 чел-Зв** приводит к потере **1 чел-года** жизни для населения [37].

В области *малых доз* (менее 0.5 Зв) индивидуальный и коллективный риски возникновения стохастических эффектов определяются соответственно:

$$r = p(E) \times r_E \times E, \tag{2.81}$$

$$R = p(S_E) \times r_E \times S_E, \tag{2.82}$$

или

$$r_i = \int_0^{\infty} p_i(E) \times r_E \times E dE, \quad (2.83)$$

$$R = \sum_{i=1}^{N} r_i, \quad (2.84)$$

где $P(E)$ – вероятность получить дозу E ; r и R – индивидуальный и коллективный риски, соответственно ; E и S_E – индивидуальная и коллективная эффективная дозы; r_E – коэффициент риска от смертельного рака, серьезных наследственных эффектов и несмертельного рака (приведенного по вреду к последствиям от смертельного рака).

Для **профессионального** облучения:
$r_E = 5.6 \times 10^{-2}$ [1/чел-Зв] при $E < 200$ мЗв/год,
$r_E = 1.1 \times 10^{-1}$ [1/чел-Зв] при $E > 200$ мЗв/год.
Для **населения**:
$r_E = 7.3 \times 10^{-2}$ [1/чел-Зв] при $E < 200$ мЗв/год,
$r_E = 1.5 \times 10^{-1}$ [1/чел-Зв] при $E > 200$ мЗв/год.

Для событий с тяжелыми последствиями от детерминированных эффектов консервативно принимается:

$$r = p(E), \quad (2.85)$$

$$R = p(E) \times N. \quad (2.86)$$

Риск потенциального облучения оправдан, если

$$R < (V\text{-}P\text{-}X) / \alpha, \quad (2.87)$$

$$R < (V\text{-}P\text{-}X) / \alpha N, \quad (2.88)$$

где V – валовой доход; P – затраты на основное производство; X – затраты на защиту; α – цена риска (денежный эквивалент единицы риска), или, если

$$\sum_{i=1}^{N} (r_{i,C} \times \overline{O_C} + r_{i,g} \times \overline{O_g}) \times C_T \le V - P - X, \quad (2.89)$$

где $\overline{O_C}$ – среднее сокращение периода полноценной жизни в результате возникновения стохастических эффектов, равное 15 лет; $\overline{Og}$ – среднее сокращение периода полноценной жизни в результате возникновения детерминированных эффектов, равное 45 лет; C_T – денежный эквивалент потери 1 чел-года жизни населения.

Предел индивидуального риска для техногенного облучения лиц из персонала принимается 1.0×10^{-3} в год, для населения 5.0×10^{-5} в год.

Уровень пренебрежимого риска разделяет область оптимизации риска и область безусловно приемлемого риска и составляет 10^{-6} в год.

2.14. РИСК-КОММУНИКАЦИИ

Риск-коммуникации есть некий целенаправленный обмен информацией о рисках [38]. Формально он может быть определен как процесс передачи информации среди заинтересованных сторон об уровнях риска, значимости или значениях риска, решениях, действиях или политике, имеющей целью управление риском. К заинтересованным сторонам относятся: правительственные организации, фирмы, общественные объединения, средства массмедиа, профессиональные организации, ученые, частные лица.

Под риск-коммуникациями понимают также всю информацию и данные, необходимые для управления риском, адресованные ЛПР [63].

Научная информация о рисках поступает к заинтересованным сторонам из различных источников. Усилия по коммуникациям могут быть разочаровывающими как для источников информации,

так и для ее потребителей. Представляющие информацию о риске часто жалуются, что неспециалисты неправильно воспринимают и оценивают эту информацию. Представители же населения и общественных организаций, в свою очередь, жалуются, что научные сообщества не воспринимают их озабоченности и не заинтересованы в действиях по решению простых проблем. В данном контексте, медиа средства зачастую служат передатчиком информации о риске. Однако, как правило, их критикуют за излишнее преувеличение рисков и драматизацию научных фактов.

Проблемы коммуникации.

Анализ проблем риск-коммуникации показывает, что они обусловлены проблемами: сообщения, источников, каналов и получателей.

Проблемы сообщения включают:

- недостаток научных знаний, данных, моделей и методов, приводящих к большим неопределенностям в оценках риска;
- методы анализа риска часто непонятны для неспециалистов.

Проблемы источников включают:

- отсутствие доверия у ответственных специалистов;
- отсутствие согласия у экспертов;
- отсутствие полномочий и ресурсов для решения проблем риска;
- отсутствие данных для учета специфических опасений и боязней индивидуумов и сообществ;
- отсутствие событий для выявления ограничений оценок риска и результирующих неопределенностей;
- недостаточность понимания таких категорий, как интересы, обеспокоенности, боязни, приоритеты, ценности и предпочтения индивидуумов и различных групп,
- использование бюрократического, юридического и технического языков.

Проблемы каналов включают:

- необъективное, предвзятое, пристрастное, тенденциозное освещение событий, которое подчеркивает их драматический характер, ущерб;

- преждевременное раскрытие информации;
- упрощение, искажение и неточность в интерпретации технической информации о риске.

Проблемы получателей включают:

- неправильное восприятие уровней риска;
- отсутствие интереса к проблемам технических сложностей и риска;
- крайнюю самоуверенность в способности избежать ущерба;
- уверенность в устойчивости к изменениям;
- переоценку эффективности регулирующих действий;
- желание и требование научной определенности;
- нежелание находить компромисс между различными типами рисков или рисками, стоимостью и выгодами.
- трудности в восприятии вероятностной информации, относящейся к новым технологиям.

Подчеркивая широкий спектр вопросов, исследовательская литература по риск-коммуникациям соотносит подобные разнообразные области к социальной психологии, экономике, массмедиа, лингвистике, антропологии, принятию решений, социологии, политике, здравоохранению, медицине, юриспруденции и философии.

Предполагается, что задачи риска в данном контексте могут быть отнесены к одному из четырех типов в соответствии с основными целями и планируемыми эффектами коммуникаций:

- информация и образование (обучение);
- изменение поведения и защитные действия;
- предупреждение катастроф и информация об авариях;
- решение общих проблем и разрешение конфликтов.

На практике эти четыре типа задач могут взаимно перекрываться, тем не менее концептуально они все еще могут быть классифицированы. Задача информирования и обучения публики может рассматриваться как задача обеспечения непрофессиональной части населения полезной поясняющей информацией. Задача же изменения поведения и защитных действий и предупреждения катастроф и информация об авариях может рассматриваться как директивная задача и направляться на мотивацию специальных действий населения. Эти три задачи, в свою очередь, отличны от задачи вовлече-

ния населения в решение проблем и конфликтов, когда официальные лица и жители обмениваются информацией и сообща работают над решением имеющихся проблем. Вообще говоря, каждая из перечисленных задач может быть отождествлена с соответствующим набором характерных проблем.

Агентство по защите окружающей среды США опубликовало свод правил и рекомендаций для эффективных риск-коммуникаций [38]. В предисловии к ним отмечается, что отсутствуют простые рекомендации для эффективных риск-коммуникаций. Также подчеркивается, что многие из правил могут показаться очевидными, однако, на практике они постоянно нарушаются. Соответственно, правильным является перечисление этих правил с выявлением обстоятельств, почему зачастую они не выполняются.

Правило 1: Рассматривать и использовать общественность как легитимного партнера.

Два основных принципа риск-коммуникаций в обществе, основанном на демократии, понятны и приемлемы. Первое, люди и объединения имеют право участвовать в принятии решений, которые затрагивают их жизнь, собственность и то, что они ценят. Второе, цель риск-коммуникаций не в распространении озабоченности населения или стремлении избежать каких-либо действий, а скорее в «создании» информированной публики, т.е. вовлеченной в проблематику, интересующуюся, благоразумную, думающую и ориентированную на принятие решений.

Рекомендации. Демонстрировать свое уважение к людям и искренность в стремлении учесть общественное мнение до того, как важные решения будут приняты. Привлекать к обсуждению все заинтересованные стороны.

Правило 2: Планировать тщательно и оценивать выполнение.

Различные слои общества и медиасредства требуют использования различной стратегии риск-коммуникаций. Цель будет достигнута только в случае тщательного планирования.

Рекомендации. Начните с формулировки ясных и понятных целей, таких как доступность информации для населения, мотивирование индивидуумов к действиям, стимулирование действий по предотвращению чрезвычайных ситуаций и обеспечение разрешения конфликтных ситуаций. Оцените имеющуюся информацию о риске и ее слабые и сильные стороны. Классифицируйте различные подгруппы в своей аудитории и сформулируйте конкретную цель риск-коммуникации для каждой подгруппы. Подбирайте для презентаций людей из числа хороших докладчиков, умеющих взаимодействовать с аудиторией. Тренируйте свой персонал, в том числе, в умении взаимодействовать с аудиторией; поощряйте за хорошо выполненную работу. Всегда, когда возможно, проводите предварительный анализ ваших заявлений. Тщательно взвешивайте свои поступки и учитесь на ошибках.

Правило 3: Прислушивайтесь к аудитории.

Люди больше обращают внимание на такие категории как доверие, ответственность, компетенция, искренность, добровольность, внимательность и сочувствие, чем на статистику смертности и детали оценок риска. Если вы не слышите аудиторию, вы не можете ожидать, что аудитория прислушается к вам. Общение – двусторонняя деятельность.

Рекомендации. Не делайте предположений о том, что люди знают, думают или собираются делать относительно рисков. Уделите время на выяснение того, что думают люди. Используйте для этого интервью, обзоры и опросы. Пусть все группы, заинтересованные в данном аспекте, будут услышаны. Узнайте обеспокоенности людей. Пусть люди поймут, что вы понимаете, о чем они говорят; воспринимаете их обеспокоенности как свои собственные. Разберитесь в скрытых намерениях, символических значениях и тонкостях экономического и политического рассмотрений, усложняющих, как правило, задачу риск-коммуникаций.

Правило 4: Будьте честным, искренним и открытым.

В передаче информации о риске вера и доверие ваш главный капитал. Его трудно завоевать, а однажды утратив, почти невозможно восстановить.

Рекомендации. Представьте ваши рекомендации, но не требуйте и не ожидайте доверия у публики. Если вы не знаете ответ, или он не однозначен – скажите это. Вернитесь к людям с ответом. Допускайте возможность ошибок. Раскрывайте информацию о риске настолько рано, насколько это возможно (подчеркивая любые возможные аспекты надежности). Не преуменьшайте и не преувеличивайте уровни риска. Делайте предположения с большой осторожностью. Если сомневаетесь, изучите вопрос дополнительно, иначе люди могут подумать, что вы что-то скрываете. Обсудите неопределенности в данных, их сильные и слабые стороны, включая данные, полученные из других, заслуживающих доверия источников. Сделайте консервативные оценки, соответствующие худшему варианту развития событий, и упомяните диапазон оценок риска, если это возможно.

Правило 5: Используйте другие вызывающие доверие источники и согласовывайтесь с ними.

В передаче информации о риске большую помощь могут оказать союзники. Конфликты и отсутствие доверия у людей к некоторым источникам информации могут существенно осложнить процесс риск коммуникаций.

Рекомендации. Уделите время для координации всех связей внутри и вне организации. Найдите время и ресурсы для наведения мостов с другими организациями. Используйте авторитетных и пользующихся доверием посредников. Проводите консультации на предмет выявления тех, кто лучше других сможет ответить на вопросы о риске. Старайтесь установить связи с другими заслуживающими доверия источниками, такими как заслуживающие доверия университетские специалисты, местные власти, врачи, признанные лидеры.

Правило 6: Войдите в контакт с массмедиа.

Массмедиа – главное звено в передаче информации о риске. Средства информации играют ключевую роль в планировании и определении результатов. Они обычно больше уделяют внимания политике, а не риску; простым вопросам, а не сложным; опасности, а не безопасности.

Рекомендации. Будьте открытым и доступным для репортеров. Уважайте их график работы. Подготовляйте информацию в виде, удовлетворяющем потребности всех ветвей массмедиа, например, графические и другие вспомогательные средства для телевидения. Подготовьте заранее вспомогательный материал по сложным проблемам риска. Следуйте изложению с похвалой или критикой, когда необходимо. Старайтесь установить атмосферу доверия с репортерами и редакторами.

Правило 7: Выражайтесь понятно и с сочувствием.

Используйте простой, не технический язык. Будьте внимательны к местным нормам в таких областях как язык и одежда. Используйте яркие, живые, конкретные примеры для общения на персональном уровне. Используйте примеры и анекдоты, которые делают технические данные о риске прозрачными. Избегайте абстрактный, невоспринимаемый язык при описании болезней, смертей и ранений. Допускайте и отвечайте на эмоции, которые выражают люди (как словесно, так и в действиях): беспокойство, тревогу, боязнь, раздражение, гнев, насилие, беспомощность. Допускайте и отвечайте на отличительные признаки, которые люди считают важными в оценках риска. Используйте сравнения риска, которые помогут оценивать риски в перспективе, но избегайте сравнений, игнорирующие признаки, которые люди считают важными. Старайтесь провести дискуссию о действиях, которые проводятся или могут быть использованы. Сообщите, чего вы не можете сделать. Обещайте только то, что сможете сделать, и обязательно сделайте то, что пообещали. Никогда не говорите, что смерть, болезнь или ранение являются трагедией.

Глава 3

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКА

3.1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно принципу несовместимости, сформулированному основоположником теории нечетких множеств Л. Заде, сложность системы и точность, с которой ее можно проанализировать традиционными методами, находятся в состоянии взаимного противоречия [39]. Другими словами, по мере возрастания сложности системы наша способность формулировать точные, содержащие смысл утверждения о ее поведении уменьшается вплоть до некоторого порога, за которым точность и смысл становятся взаимоисключающими. Этот принцип явился одной из главных предпосылок появления нечеткой математики и ее базы – теории нечетких множеств.

3.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Неопределенная информация может иметь различные формы. Неопределенность может быть обусловлена сложностью, неведением, случайностью различного типа. Она может быть следствием неточности, невозможности провести адекватные измерения (т.е. ошибок измерений, интерполяции и экстраполяции, различных допущений), недостатка знаний или неясности, как, например, нечеткость, присущая нашему естественному языку общения. На практике, как правило, независимо от реального характера информации, предполагают случайный характер неопределенности измерений, что обусловливает использование теории вероятностей как базовой теории для выражения неопределенности.

Вместе с тем, вероятностные методы оказались малоэффективными в случаях, когда неопределенности неслучайной природы играют решающую роль. Этим объясняется интерес, появившийся в 60-70 годах прошлого века к моделям неопределенности, альтернативным вероятностным. К их числу можно отнести субъективную вероятность [40], верхние и нижние вероятности Демпстера [41], правдоподобие и доверие Шеффера [42], которые обобщают конструкции Демпстера, а также возможность Заде [43], базирующуюся на его теории нечетких множеств [44].

В соответствии с современными математическими представлениями неопределенность измерений может быть отнесена к одному из двух типов: случайному (вероятностному) и нечеткому. В первом случае используется теория вероятностей, во втором – теории, базирующиеся на теории нечетких множеств (например, теория возможностей).

В настоящее время вероятностный подход является доминирующим при представлении и обработке результатов измерений. К его недостаткам можно отнести следующее:

представление погрешностей измерений как случайных погрешностей далеко не всегда является обоснованным;

закон распределения погрешностей, как правило, постулируется неоправданно (в большинстве случаев предполагается нормальный закон);

вероятностный подход очень трудно агрегировать с другими подходами, используемыми при компьютерной обработке информации. Это является барьером на пути создания интеллектуальных средств измерений.

Все более широкое использование интеллектуальных средств измерений, вмешательство человека (эксперта) с его субъективизмом в процесс измерений и обработки результатов приводит к тому, что фактически характеристики погрешности являются нечеткими. Однако методические руководства рекомендуют обрабатывать их как вероятностные характеристики неких генеральных совокупностей, которым, в свою очередь, приписываются некие законы распределений.

Альтернативами вероятностному подходу могут служить интервальный анализ и нечеткий подход. Интервальный подход не на-

шел широкого применения в метрологии, возможно из-за существенно завышенных оценок погрешности при большом числе составляющих, что делает его использование нецелесообразным. Нечеткий же подход не может быть использован как единственная альтернатива вероятностному подходу до тех пор, пока не будет решен ряд вопросов теоретического и практического характера.

На практике, как правило, приходится иметь дело как со статистическими параметрами, так и с нечеткими. Типичный пример: метрологический анализ результатов измерений, осуществляемый с использованием модели объекта. В этом случае априорная информация об объекте, представляемая экспертом на основе своего опыта, корректно формализуется как нечеткая. Характеристики же погрешности средств измерений представляются как вероятностные. Другой пример: оценка погрешности результатов математической обработки измеренной информации, например, при решении некорректных задач, когда опыт или интуиция используется для введения априорной информации и/или для прекращения процесса получения решения.

Заметим, что интеллектуальные системы измерений, как правило, оперируют с нечеткими переменными [45]. Поэтому при их метрологическом анализе необходимо рассмотрение и учет (агрегирование) различных факторов: характеристик погрешностей входных данных, вклада в погрешность математической обработки, априорной информации и средств искусственного интеллекта.

С учетом вышесказанного рассмотрение возможности введения теорий, использующих нечеткие множества, в рамки теории погрешностей наряду с теорией вероятностей представляется разумным и своевременным. Переосмыслению теории погрешностей и теории измерений с позиции теории нечетких множеств посвящен целый ряд публикаций, например, [46,47,48]. Отметим в этой связи, что простое объединение теорий невозможно в силу различия аксиоматики, применяемого математического аппарата и используемых критериев. В этой связи введение в международные документы ИСО и в отечественные рекомендации понятия «неопределенность» (вместо «погрешность») представляется целесообразным шагом в попытке сблизить вероятностный и нечеткий подходы.

Признавая невозможность немедленного перевода теории погрешностей и теории измерений на формализм нечетких переменных, отметим естественные требования теоретического и практического характера, которым должна удовлетворять общая теория. Это, прежде всего, требования полноты, непротиворечивости, преемственности и конструктивности [49].

Оригинальный эскиз теории возможностей, отличающийся от представленных в [43,50], приведен в [51]. Построение теории возможностей, описываемое в этой монографии, следует схеме теории вероятностей, что позволяет проследить формальные аналогии и различия понятий и методов двух теорий.

Возможный подход для получения агрегированной оценки при наличии двух типов переменных рассмотрен в [52].

Бурное развитие за короткий срок нечеткой математики дает основания предположить, что, возможно, не за горами время, когда теории, развивающиеся на базе теории нечетких множеств, займут наряду с теорией вероятностей достойное место в метрологическом обеспечении измерений. Наша задача, как минимум, быть готовыми к этому.

3.3. СЛУЧАЙНОСТЬ И НЕЧЕТКОСТЬ

Исторически теория вероятностей являлась основным средством для описания неопределенности. Поэтому предполагалось, что любая неопределенность является случайной. Случайным процессом является процесс, где конкретная его реализация является делом случая. В этом смысле предсказание последовательности событий невозможно. Можно определить *статистики* случайного процесса при наличии большого числа его реализаций. Однако не всякая неопределенность является случайной. Некоторые формы неопределенности не являются случайными, и поэтому не предназначены для обработки или моделирования с использованием теории вероятностей. Теория нечетких множеств как раз и является инструментом для моделирования и обработки неопределенности, ассоциируемой с нечеткостью, расплывчатостью и/или недостатком информации. В очень многих задачах, особенно связанных со слож-

ными системами и процессами, приходится констатировать отсутствие полной информации, необходимой для решения проблем управления. Часть информации может быть субъективной, отражающей пристрастия, а, возможно, и интуицию конкретного индивидуума. Как учесть подобную информацию при решении (моделировании) задачи? Наиболее распространенный способ передачи информации – использование естественного языка общения. Несмотря на то, что язык по своей природе неточен и расплывчат, он является наиболее мощным средством общения людей. Люди, как правило, не испытывают трудностей при восприятии информации и идей. Так, несмотря на то что каждый человек по-своему воспринимает, (нечеткое) понятие «толстый», все понимают, о чем идет речь. То есть, слово «толстый» несет в себе подобную информацию для разных индивидуумов. Отметим, что для компьютера такая информация недостаточна, ему требуется точность в инструкциях – начиная с какого веса считать человека толстым. В этой связи, пожалуй, одним из самых больших преимуществ теории нечетких множеств является то, что она дает возможность использования качественной информации (лингвистических переменных) для описания нечетких понятий.

Использование теории нечетких множеств и нечеткой логики в компьютерных расчетах и моделях демонстрирует значительные преимущества в случаях, когда интуиция и субъективные суждения играют существенную роль. Характерными примером таких применений являются сферы контроля и управления. Сложно ожидать преимуществ от использования нечеткой логики для описания простых систем. Представляется возможным выделение двух типов ситуаций, где наиболее эффективно применение нечеткой логики: очень сложные модели, понимание которых ограничено и/или субъективно, а также процессы, где в значительной мере используются восприятия, рассуждения и принятия решений субъектом.

Наше понимание сложных процессов базируется во многом на нечетких рассуждениях. Эти нечеткие рассуждения тем не менее представляют информацию, которая может быть полезной. Возможность ее агрегирования и использования в общем контексте моделирования процессов и является мерой оценки полезности и эффективности нечетких подходов. Несомненно, нечеткие подходы

вряд ли целесообразно использовать в задачах, требующих высокую точность. Однако не так уж много задач, с которыми сталкивается человек, требуют такой точности. Тем более, что получение высокой точности очень часто сопряжено с большими вычислительными затратами, иногда не укладывающимися в разумные рамки. Нечеткие подходы в подобных ситуациях позволяют получить некое оптимальное решение – существенно меньшее по стоимости при незначительном снижении точности. Приемлемо ли такое решение? Ответ зависит от конкретной ситуации, однако для подавляющего большинства проблем, с которыми мы сталкиваемся ежедневно, ответ, несомненно, положительный.

Можно сказать, что уяснить природу неопределенностей в системе – значит сделать существенный шаг в анализе самой системы. А с ростом информации о системе растет качество моделирования и управления.

3.4. СТАТИСТИКА И СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Статистический анализ базируется на теории вероятностей, в то время как большинство неопределенностей, например, в экспериментальных результатах содержит случайную (статистическую) и неслучайную (систематическую) составляющие. Один из классов случайных процессов – случайные стационарные процессы удовлетворяет следующим характеристикам:

пространство измерений остается постоянным для различных экспериментов;

частота проявления эффекта или вероятность остается постоянной для различных испытаний;

результаты должны быть воспроизводимыми, т.е. результат не должен меняться от эксперимента к эксперименту.

События в таких процессах обусловлены случайностью. Случайность характеризуются частотой проявления (вероятностью), которая может быть измерена. Задачи, связанные с бросанием монеты или игральной кости, извлечением шаров из урны, многие карточные задачи – типичные примеры случайных стационарных процессов. Однако как много проблем, с которыми человек сталкивается ежедневно, может быть отнесено к разряду случайных? Не-

определенность в погоде – это случайный процесс? Неопределенность в выборе, что одеть; что купить, или ваши предпочтения цвета – это случайный процесс? Каков риск для человека, употребляющего некий продукт, получить какое-либо заболевание лет через пятнадцать? Хотя все эти формы неопределенности можно моделировать с использованием случайных процессов, решения на их основе могут не заслуживать доверия. Применение нечетких подходов в этих случаях может оказаться оправданным. Таким образом, необходимо тщательным образом изучить характер неопределенностей в системе, а затем выбирать соответствующую модель для описания системы. При этом необходимо учитывать многие характеристики системы, которые могут меняться в пространстве и времени. Например, в случае с погодой, когда в прогнозе на завтра вероятность дождя определяется как 70 процентов, значит ли это, что завтра будет дождь; или, что для завтрашней даты дождливыми были дни для 70 лет из 100 прошедших? Значит ли это, что 70 процентов земли в окрестностях будет смочено дождем, или, что в течение 70 процентов времени будет идти дождь? Человек, как правило, обрабатывает подобные неопределенности лингвистически – «скорее всего завтра будет дождь». И что самое важное, на основании столь грубых оценок возможности дождя, люди могут принимать правильные решения относительно погоды.

Случайные ошибки, в отличие от неслучайных (систематических) ошибок обычно усредняются во времени (или в пространстве). Неслучайные ошибки могут возрастать практически неограниченно. Очень часто провести различие между ними крайне сложно, что затрудняет выбор адекватных методов обработки.

Резюмируя, можно сказать, что ни теория вероятностей, ни теория нечетких множеств, ни другие подобные теории не в состоянии каждая в отдельности адекватно описать или объяснить процессы, с которыми мы сталкиваемся ежедневно. В общей же связке они представляют собой мощный математический аппарат.

3.5. ВИДЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Как уже отмечалось, при решении большинства проблем приходится сталкиваться с различной информацией. Условно ее можно

отнести к одному из следующих типов (рис. 3.1): определенная (надежная), неопределенная и полное незнание. В свою очередь, неопределенная информация может быть случайной и нечеткой.

Рис. 3.1. Виды неопределенности в информационном мире

Только незначительная часть проблем может быть отнесена к разряду определенных, или детерминистских. Большая часть проблем характеризуется неопределенной информацией. Неопределенность в информации может иметь различную природу. Она может проистекать из сложности задачи, например, когда мы имеем дело с надежностью систем атомного реактора. Неопределенность может быть следствием незнания, случайности, неточности, невозможности провести адекватные измерения или из-за расплывчатости типа нечеткости, присущей естественному языку.

Нечеткие множества и нечеткая логика являются хорошей математической основой для представления нечеткости во многих областях деятельности человека. Например, они позволяют формализовать задачи нечеткого управления техникой, оптимального управления и оптимального выбора. Выбор богатой и красивой невесты в нечетких множествах богатых и красивых – характерный шутливый пример возможного применения теории нечетких множеств.

Природа неопределенности в рассматриваемой проблеме – очень важный пункт, который должен быть внимательно проанализирован до того, как будут выбраны методы обработки информации. В случае неопределенностей случайной природы необходимо использовать теорию вероятностей, а в случае неопределенностей нечеткой природы – теории, базирующиеся на теории нечетких множеств. Таким образом, необходимы методы и соответствующие программные продукты для обработки как случайной, так и нечеткой информации.

3.6. ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА

Риск – сложная многофакторная категория. Она включает как объективную составляющую, так и субъективную. Кроме того, значительная часть информации, которую необходимо использовать для оценок и управления риском является нечеткой, плохо формализованной, слабоструктурированной.

Проблемы анализа, оценки и управления риском связаны как с использованием неопределенной информации, так и математических моделей, адекватность которых, как правило, оценить затруднительно. Это может быть источником существенных, трудно прогнозируемых погрешностей. Оценки риска, как правило, основываются на подходе, базирующемся на теории вероятностей. Этот подход в большинстве случаев зависит от моделей, использующих логические структуры: дерево событий, дерево отказов. Для получения возможного разброса оценок риска необходим корректный учет неопределенностей входных параметров. Эти неопределенности могут быть обусловлены ошибками измерений, интерполяции или экстраполяции, дискретизации и аппроксимации, различных

допущений, вариабельностью и т.п. Одним из широко распространенных методов для описания неопределенностей входных параметров является использование плотности распределения вероятностей. Для большинства задач оценки риска это является приближением, которое вносит дополнительный вклад в неопределенность наряду с использованием дерева событий и дерева отказов, а также допущений, которые на практике зачастую оказываются необоснованными. Анализ "непредвиденных" аварий и катастроф показывает, что во многих ситуациях выводы, базирующиеся на вероятностном анализе риска, были чрезмерно оптимистичными. Неопределенности, соответствующие экстремально редким событиям, являются еще более чувствительными в плане анализа и оценки и, следовательно, результаты требуют более осторожного анализа.

Поскольку неопределенности входных параметров, описывающих исходные события аварийных ситуаций, можно условно отнести к одному из двух классов: случайному (вероятностному) и нечеткому, соответственно и модели, в рамках которых осуществляются оценки риска, назовем вероятностными и нечеткими. Существенным источником погрешностей при получении оценок риска может являться использование вероятностных моделей для обработки переменных, не являющихся по своей природе случайными. Переход к нечетким моделям в этом случае дает принципиальную возможность получения адекватных оценок риска и их погрешностей. Операции над нечеткими переменными часто соответствует ситуации, когда статистически достоверная информация о вероятностях параметров отсутствует и/или не может быть постулирована. Вероятностный же подход, напротив, целесообразно использовать, когда характеристики параметров хорошо известны или могут быть вычислены с необходимой точностью на основании имеющейся статистической информации.

Отметим, что нечеткие модели могут быть использованы и для описания неопределенностей в вероятностном анализе, однако нечеткие вычисления отличаются от вероятностных математически и концептуально и более соответствуют случаям, когда плотности распределения вероятностей неизвестны и оцениваются субъективно. Подобная ситуация характерна для задач определения надежности технических систем и оценки риска.

Для использования нечетких моделей в задачах оценки риска необходимо обобщить аппарат формального описания риска на случай информации не статистической, а нечеткой природы.

3.7. НЕЧЕТКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКА

3.7.1. Вероятностные модели

3.7.1.1. Формальное описание риска в вероятностных моделях

Количественное описание риска, как правило, опирается на теоретико-вероятностный подход [23]. Пусть D – множество всех возможных неблагоприятных событий:

$$D = \{d_1, d_2, ..., d_n\}. \tag{3.1}$$

В общем случае в определенной конкретной ситуации могут одновременно наступать многие из этих событий. Каждое мыслимое сочетание таких событий обозначим B. К ним целесообразно причислить само множество D и пустое множество $\varnothing$ (отсутствие неблагоприятных событий). Определенное сочетание B является, таким образом, подмножеством неблагоприятных событий множества D:

$$B = \{d_{k1}, d_{k2}, ..., d_{km}\}; \quad d_{kj} \in D, \quad j = 1, ..., m. \tag{3.2}$$

Пусть E_i вариант решения, с которым связаны сочетания неблагоприятных событий B_{i1}, B_{i2}, ..., Bik_i. Обозначим через $B^0{}_i$ гарантированное отсутствие неблагоприятных событий для E_i, тогда

$$B^f_i = \{B_{i1}, B_{i2}, ..., Bik_i, B^0{}_i\} \tag{3.3}$$

полная, связанная с решением E_i система событий. Предположим, что каждому сочетанию неблагоприятных событий B_{ij} (j=1, ..., k_i),

которое может реализоваться в результате принятия решения $E_i \subset E$, а также событию $B^0{}_i$ можно приписать вероятности p_i (B_{ij}) и, соответственно, p_i ($B^0{}_i$):

$$0 \le p_i(B_{ij}) \le 1, \quad \sum_{j=1}^{k_i} p_i(B_{ij}) + p_i(B_i^0) = 1. \tag{3.4}$$

Если далее каждому сочетанию B_{ij} может быть поставлено в соответствие количественно описываемое последствие A_{ij}, то величина сопутствующего решению E_i риска R_i определяется формулой

$$R_i = \sum_{j=1}^{k_i} A_{ij} p_j(B_{ij}) \tag{3.5}$$

Величина R_i представляет, таким образом, среднюю (ожидаемую) величину ущерба при принятии варианта решения E_i.

Иногда под риском понимают просто вероятность наступления определенного сочетания неблагоприятных событий $D_0 \in B^f_i$. Такой подход особенно целесообразен, когда последствия A_{i0} риска для E_i и D_0 не заданы. Тогда при использовании функции-индикатора $D_j \to 1_0$, определяемой условиями

$$1_0(D_j) = \begin{Bmatrix} 1 & \text{при} & D_j = D_0 \\ 0 & \text{при} & D_j = D_0 \end{Bmatrix} \quad D_j \in K_i \tag{3.6}$$

для $A_{ij} = 1_0(D_j)$ в соответствии с (3.6) получаем:

$$R_i = p_i(\mathrm{D_0}). \tag{3.7}$$

Если, напротив, при принятии решения E_i все вероятности реализации сочетания неблагоприятных событий $B_{ij} \in B^f_i$ одинаковы, то есть $p_i(B_{ij}) = p_i$, то в соответствии с (3.7)

$$R_i = p_i \sum_{j=1}^{k_i} A_{ij}. \qquad (3.8)$$

При принятии решения E_i для определяемой связью между сочетанием неблагоприятных событий B_{ij} и последствием A_{ij} функции риска A_i: $B_{ij} \to A_{ij}$, $j=1, ..., k_i$, представляют особый интерес два частных случая.

Если для двух взаимоисключающих сочетаний B_{ij} и B_{it}, $j \neq t$, т. е. $B_{ij} \cap B_{it} = 0$, справедливо равенство

$$A_i(B_{ij} \cup B_{it}) = A_i(B_{ij}) + A_i(B_{it}), \qquad (3.9)$$

то говорят об аддитивных *штрафных функциях* и, соответственно, аддитивных *функциях риска.*

В этом случае для сочетаний, которые состоят из единственного неблагоприятного события $B_{i1} = \{d_1\}$, $B_{i2} = \{d_2\}$, ..., $B_{in} = \{d_n\}$, справедливо соотношение

$$A_i(d_1 \cup d_2 \cup ... d_n) = A(d_1) + A(d_2) + ... + A(d_n) \qquad (3.10)$$

и

$$R_i = \sum_{d \in D} A_i(d) p_i(d). \qquad (3.11)$$

Мы имеем дело с так называемой *нормальной* штрафной функцией B_i и, соответственно, функцией риска A_i, когда для двух взаимоисключающих сочетаний B_{ij} и B_{it}, $j \neq t$, справедливо соотношение

$$\max \{A_i(B_{ij}), A_i(B_{it})\} = A_i(B_{ij} \cup B_{it}) = A_i(B_{ij}) + A_i(B_{it}). \qquad (3.12)$$

Этот случай служит показательным примером аддитивной штрафной функции. Определим теперь для B_{ij}, $B_{it} \in B^f_i$ дополнительный ущерб за счет B_{it} при B_{ij} на основании соотношения

$$A_i(B_{it} \mid B_{ij}) = A_i(B_{ij} \cup B_{it}) - A_i(B_{ij}). \qquad (3.13)$$

Отсюда следует:

$$A_i(B_{i1} \cup B_{i2} \cup ... \cup B_{ik_i}) = A_i(B_{i1}) + A_i(B_{i2} \mid B_{i1}) + \\ + A_i(B_{i3} \mid B_{i1} \cup B_{i2}) + ... + A_i(B_{ik_i} \mid B_{i1} \cup ... \cup B_{ik_i-1}), \qquad (3.14)$$

и в случае аддитивной штрафной функции получаем простое выражение:

$$A_i(B_{it} \mid B_{ij}) = A(B_{it}) \qquad (3.15)$$

Вариант решения $E_i \in E$ без учета возможности неблагоприятных последствий будет иметь полезность e_i. Тогда соответствующую варианту решения E_i величину

$$G_i = e_i - R_i \qquad (3.16)$$

называют *суммарным эффектом решения.*

Множество рациональных вариантов решения обозначают:

$$E^* := \{ E_i \in E : G_i > 0 \}. \qquad (3.17)$$

Вариант решения E^*_i называется оптимальным в случае

$$G_i^* = \max_{E_i \in E} G_i. \qquad (3.18)$$

При этом в рамках конкретной практической задачи множество допустимых вариантов решения может быть дополнительно ограничено пределами риска.

3.7.2. Нечеткие модели

При обработке параметров нечеткой природы в задачах оценки риска целесообразно использовать нечеткие модели.

Для использования нечетких моделей необходимо определить основные операции над нечеткими переменными, обобщить аппарат формального описания риска на случай информации не статистической, а нечеткой природы, разработать соответствующие алгоритмы и программные продукты.

3.7.2.1. Понятие нечёткого множества

Математическая теория нечетких множеств, предложенная Л. Заде более четверти века назад, позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы. С выходом в 1965 г. статьи Л. Заде "Нечеткие множества" [44] начинается исключительно бурное развитие новой теории, предназначенной для изучения и анализа систем, в которых основная роль принадлежит суждениям и решениям человека. Поскольку эти системы связаны с принципиально нечетким (размытым, расплывчатым) характером информации, то сама новая теория получившая название "теории нечетких множеств" и есть обобщение обычной (четкой) теории множеств.

Исходным понятием обычной теории множеств является понятие принадлежности элемента x некоторого множества X к определенному подмножеству $A \subset X$: $(x \in A)$. Для выражения этой принадлежности можно использовать и другое понятие - характеристическую функцию $\chi_A(x)$, значение которой указывает, является ли x элементом A:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, x \in A, \\ 0, x \notin A. \end{cases} \qquad (3.19)$$

Однако этого понятия оказалось недостаточно для рассмотрения ситуаций, которые описываются с помощью нечетко определенных понятий типа "множество высоких людей", "множество чисел много больше 10", и т. д. В основе теории нечетких множеств лежит представление о том, что составляющие множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать этим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать данному множеству с различной степенью. При таком подходе высказывание типа "элемент принадлежит данному множеству A" теряет смысл, поскольку необходимо указать, с какой степенью элемент принадлежит данному множеству. Это множество степеней принадлежности может оцениваться на бесконечной шкале действительных (или рациональных) чисел от 0 до 1, или на части чисел интервала [0,1], в том числе и на конечной шкале. Например, объект, определяемый выражением $A = \{(x_1|0{,}2), (x_2|0), (x_3|0{,}3), (x_4|1), (x_5|0{,}8)\}$ будем называть нечетким подмножеством множества X, где x_i – элемент универсального множества X, а число после вертикальной черты задает значение функции принадлежности на этом элементе. Следовательно, рассмотренное нечеткое подмножество A содержит в небольшой степени x_1, не содержит x_2, содержит x_3 в немного большей степени, чем x_2, полностью содержит x_4, и в значительной степени содержит x_5. Таким образом, подход к формализации нечёткости состоит в следующем. Нечёткое множество образуется путём введения обобщённого понятия принадлежности – расширения двухэлементного множества значений характеристической функции $\{0,1\}$ до континуума $[0,1]$. Это означает, что переход от полной принадлежности к полной его непринадлежности происходит не скачком, а плавно, причём принадлежность элемента множеству выражается числом из интервала [0,1].

Дадим строгое определение понятия нечеткого множества: нечёткое множество $A=\{(x, \mu_A(x)), X\}$ определяется математически как совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсального множества X и соответствующих степеней принадлежности $\mu_{A(x)}$ или непосредственно в виде *функции принадлежности* $\mu_{A(x)}$: $X \to [0,1]$.

Отметим, что в зарубежной литературе нечеткое множество B для случая дискретного, конечного пространства определений X часто обозначают как (обозначения Заде)

$$B = \left\{ \sum_i \frac{\mu_B(x_i)}{x_i} \right\} = \frac{\mu_B(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_B(x_2)}{x_2} + \ldots, \qquad (3.20)$$

где в числителе расположена функция принадлежности элемента, стоящего в знаменателе. В случае непрерывного и бесконечного пространства X в обозначениях нечеткого множества вместо знака суммы используют знак интеграла.

3.7.2.2. Основные операции над нечёткими множествами

Важнейшим вопросом использования нечетких множеств в моделях оценки и управления риском, а также их использования в системах поддержки принятия решений является построение соответствующих операторов агрегирования информации и анализ их семантики. При использовании нечетких множеств имеется возможность применять различные операторы агрегирования информации в зависимости от ситуации.

Основные операции над нечёткими множествами из класса всех нечётких множеств $F(x) = \{\mu \mid \mu: X \to [0,1]\}$ универсального множества X, которым соответствуют связки «и» и «или» приведены ниже [53].

Дополнение:

$$\mu_2(x) = 1-\mu_1(x)\,,\ \forall\, x\in X. \qquad (3.21)$$

Пересечение. Тип I – минимум:

$$\mu_3(x) = (\mu_1\wedge\mu_2)(x) = \min\{\mu_1(x),\mu_2(x)\} \quad \forall x\in X. \qquad (3.22)$$

Объединение. Тип I – максимум:

$$\mu_3(x) = (\mu_1\vee\mu_2)(x) = \max\{\mu_1(x),\mu_2(x)\} \quad \forall x\in X. \qquad (3.23)$$

Пересечение. Тип II – ограниченное произведение:

$$\mu_3(x) = (\mu_1\wedge\mu_2)(x) = \max\{0,\mu_1(x)+\mu_2(x)\ -1\} \quad \forall x\in X. \qquad (3.24)$$

Объединение. Тип II– ограниченная сумма:

$$\mu_3(x) = (\mu_1\vee\mu_2)(x) = \min\{1,\ \mu_1(x)+\mu_2(x)\} \quad \forall x\in X. \qquad (3.25)$$

Пересечение. Тип III – алгебраическое произведение:

$$\mu_3(x) = (\mu_1\cdot\mu_2)(x) = \mu_1(x)\cdot\mu_2(x) \quad \forall x\in X. \qquad (3.26)$$

Объединение. Тип III – алгебраическая сумма:

$$\mu_3(x) = (\mu_1+\mu_2)(x) = \mu_1(x)+\mu_2(x)-\ \mu_1(x)\cdot\mu_2(x) \quad \forall x\in X. \qquad (3.27)$$

Разность:

$$\mu_3(x) = \mu_1(x)\ -\ \mu_2(x) = \max\{0,\mu_1(x)\ -\ \mu_2(x)\} \quad \forall x\in X. \qquad (3.28)$$

Концентрация:

$$\mu_3(x) = \mu^2(x) \quad \forall x\in X. \qquad (3.29)$$

Жесткие, однозначные операторы неполно отражают смысл гибких, многозначных преобразований нечетких переменных, в том числе, лингвистических переменных. Поэтому практический интерес представляет построение обобщенных нечетких операторов – операторов дополнения, объединения и пересечения, которые позволяют учесть гибкость, степень компенсации операндов, специфику конкретного лица (эксперта), осуществляющего оценку риска или принимающего решения в нечеткой среде. В основе определения подобных обобщенных операторов может лежать обобщенный подход, заключающийся в их определении в классе треугольных норм и конорм [54].

3.7.2.3. Базовые сведения о триангулярных нормах

Рассмотрим аппарат *триангулярных* (треугольных) *норм* (Т-норм) и *конорм* (Т-конорм, *S*-норм), которые представляют наиболее общий класс функций f: $[0,1]\times[0,1] \to [0,1]$, удовлетворяющих требованиям к операторам конъюнкции и дизъюнкции.

Определение 1. *Триангулярной нормой* (для краткости Т-*нормой*) называется двоичная операция на единичном интервале [0,1], т.е. функция T: $[0,1]^2 \to [0,1]$ такая, что для всех $x,y,z \in [0,1]$ выполняются четыре аксиомы:

(T1) – *коммуникативность*	$T(x,y) = T(y,x)$,
(T2) – *ассоциативность*	$T(y,z)) = T(T(x,y),z)$,
(T3) – *монотонность*	$T(x,y) \le T(x,z)$ для любого $y \le z$,
(T4) – *граничные условия*	$T(x,1) = x$, $T(0,x) = T(x,0) = 0$, $T(1,x) = x$.

Это означает, что все Т-нормы совпадают на границе единичного квадрата $[0,1]^2$.

Т-норма $T(x,y)$ представляет собой оператор конъюнкции, определенный на степенях неопределенности, задаваемых значениями функций принадлежности двух или более условий в одном и том же продукционном правиле.

Определение 2. Если Т является Т-нормой, то *двойственная* к ней Т-*конорма S*: $[0,1]^2 \to [0,1]$ задается как:

$$S(x,y) = 1 - T(1-x,1-y). \tag{3.30}$$

Т-конорма $S(x,y)$ вычисляет степень неопределенности (значение функции принадлежности) заключения, выведенного из двух или более продукционных правил или степень неопределенности (значение функции принадлежности) условной части продукционного правила, в которой анцеденты соединены логической связкой "ИЛИ".

Ниже описываются основные Т-нормы и Т-конормы:

а. *Минимум* T_M и *Максимум* S_M (логика Заде):

$$T_M(x,y) = \min(x,y), \tag{3.31}$$

$$S_M(x,y) = \max(x,y). \tag{3.32}$$

б. *Произведение* T_P и *Вероятностная сумма* S_P:

$$T_P(x,y) = x \cdot y, \tag{3.33}$$

$$S_P(x,y) = x + y - x \cdot y. \tag{3.34}$$

в. Т-*норма Лукасевича* T_L и Т-*конорма Лукасевича* S_L :

$$T_L(x,y) = \max(x + y - 1,0), \tag{3.35}$$

$$S_L(x,y) = \min(x + y,1). \tag{3.36}$$

г. *Самая слабая Т-норма* T_W и *самая сильная Т-конорма* S_W :

$$T_W(x,y) = \begin{cases} \min(x,y), & \text{если } \max(x,y) = 1, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \tag{3.37}$$

$$S_W(x,y) = \begin{cases} \max(x,y), & \text{если } \min(x,y) = 0, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \tag{3.38}$$

д. *Нильпотентный минимум* T_M^{nil}:

$$T_M^{nil}(x,y) = \begin{cases} \min(x,y), & \textit{если } x + y > 1, \\ 0, & \textit{иначе.} \end{cases} \tag{3.39}$$

е. Семейство Т-*норм Франка* $(T_\lambda^F \lambda), \lambda \in [0,\infty]$:

$$T_\lambda^F \lambda(x,y) = \begin{cases} T_M(x,y), & \text{если} \quad \lambda = 0, \\ T_P(x,y), & \text{если} \quad \lambda = 1, \\ T_L(x,y), & \text{если} \quad \lambda = +\infty, \\ \log_\lambda\left(1 + \dfrac{(\lambda^x - 1)(\lambda^y - 1)}{\lambda - 1}\right), & \text{иначе.} \end{cases} \qquad (3.40)$$

ж. Семейство Т-*конорм Франка* $(T_\lambda^F \lambda), \lambda \in [0,\infty]$:

$$S_\lambda^F \lambda(x,y) = \begin{cases} S_M(x,y), & \text{если} \quad \lambda = 0, \\ S_P(x,y), & \text{если} \quad \lambda = 1, \\ S_L(x,y), & \text{если} \quad \lambda = +\infty, \\ 1 - \log_\lambda\left[1 + \dfrac{(\lambda^{1-x} - 1)(\lambda^{1-y} - 1)}{\lambda - 1}\right], & - \quad \text{иначе.} \end{cases} \qquad (3.41)$$

з. Семейство Т-*норм Ягера* $(T_\lambda^Y \lambda), \lambda \in [0,\infty]$:

$$T_\lambda^Y \lambda(x,y) = \begin{cases} T_W(x,y), & \text{если} \quad \lambda = 0, \\ T_M(x,y), & \text{если} \quad \lambda = +\infty, \\ \max(0, 1 - ((1-x)^\lambda + (1-y)^\lambda)^{1/\lambda}), & \text{иначе.} \end{cases} \qquad (3.42)$$

и. Семейство Т-*конорм Ягера* $(S_\lambda^Y \lambda), \lambda \in [0,\infty]$:

$$S_\lambda^Y \lambda(x,y) = \begin{cases} S_W(x,y), & \text{если} \quad \lambda = 0, \\ S_M(x,y), & \text{если} \quad \lambda = +\infty, \\ \min(1, (x^\lambda + y^\lambda)^{1/\lambda}), & - \quad \text{иначе.} \end{cases} \qquad (3.43)$$

3.7.2.4. Принцип расширения

Принцип расширения (обобщения) [55] как одна из основных идей теории нечётких множеств носит эвристический характер и позволяет расширить область определения исходного отображения φ на класс нечётких множеств, а также обобщить определения операций над нечёткими множествами типа 1, на нечёткие множества типа 2 (когда сами значения функции принадлежности задаются неоднозначно) и выше.

Пусть $\varphi: X \to Y$ — заданное отображение, а A — нечёткое множество в X. Тогда образ нечётких множеств A при отображении φ есть нечёткое множество B в Y с функцией принадлежности

$$\mu_B(y) = \max_{x \in \varphi^{-1}(y)} \mu_A(x), \; y \in Y, \qquad (3.44)$$

где $\varphi^{-1}(y) = \{x \in X \mid \varphi(x) = y\}$. В случае нечёткого отображения $\varphi: X \to Y$ имеем:

$$\mu_B(y) = \max_{x \in X} \{\min [\mu_A(x), \mu_\varphi(x,y)]\}, \qquad (3.45)$$

в общем случае

$$\mu_B(z) = \max_{z = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)} \{\min[(\mu_1(x_1), \mu_2(x_2), \ldots, \mu_n(x_n)]\}. \qquad (3.46)$$

Или, иначе, если $A_1, A_2, \ldots, A_N$ – нечеткие множества, определенные на пространствах $X_1, X_2, \ldots, X_N$, соответственно, а φ – функция, отображающая $X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_N$ в Y, то в соответствии с этим принципом, нечеткий образ $A_1, A_2, \ldots, A_N$, отображаемый посредством φ в B есть функция принадлежности:

$$\mu_B(y) = \max_{\substack{x_1 \in X_1, \ldots, x_N \in X_N \\ y = \varphi(x_1, \ldots, x_N)}} \{\min [\mu_{A1}(x_1), \ldots, \mu_{AN}(x_N)]\} \qquad (3.47)$$

С использованием уравнения (3.47), любые математические соотношения между четкими переменными, включая алгебраические операции, могут быть обобщены на нечеткие переменные. Нечеткое число есть нечеткое множество, определенное на вещественной прямой, т.е. пространстве R=(−∞,+∞). Пусть I и J есть два нечетких числа в пространствах X и Y соответственно. Отметим, что пространство для нечеткого числа есть интервал в R, в котором нечеткое число определено. Пусть символ * определяет одну из алгебраических операций + , − , × , /. Операция I^*J есть нечеткое число, скажем K, определяемое как $K= I^*J$.

Эта нечеткая алгебраическая операция, или расширенная операция, и K могут быть получены с использованием принципа расширения по (3.47). Отметим, что элементы интервалов X и Y, которые взаимодействуют посредством алгебраической операции *, образуют интервал Z, на котором определяется K. Более точно, $Z = X^* Y$ или $z = x^*y$, где z есть элемент Z. Следовательно, принадлежность элемента z на Z к K получается из принадлежностей элементов x на X к I и y на Y к J в соответствии с

$$\mu_K(z) = \max_{z = x^*y} \{\min [\mu_I(x), \mu_J(x)]\}. \qquad (3.48)$$

В соответствии с принципом, принадлежность $\mu_3(z)$ элементов z получается из принадлежностей $\mu_1(x)$ и $\mu_2(y)$ элементов x и y:

$$\mu_3(z) = \max_{x^*y=z} \{\min [\mu_1(x), \mu_2(y)]\}. \qquad (3.49)$$

Если $z = x + y$ или $z = x \times y$, тогда функция принадлежности z равна соответственно

$$\mu_3(z) = \max_{z=x+y} \{\min [\mu_1(x), \mu_2(z - x)]\}, \qquad (3.50)$$

и

$$\mu_3(z) = \max_{z=x\times y} \{\min [\mu_1(x), \mu_2(z / x)]\}. \qquad (3.51)$$

Принцип расширения дает общее решение для операций в нечеткой алгебре. Выражение (3.48) является обманчиво простым. На практике существует бесконечное число комбинаций x и y, которые дают одну и ту же величину z, и поиск комбинаций, обеспечивающих максимальную функцию принадлежности, является исключительно длительной процедурой. Следовательно, осуществление решения в соответствии с (3.48) является затруднительным для реальных ситуаций даже с использованием компьютера. Это связано, прежде всего, с тем, что при дискретизации переменных в вычислениях информация может теряться, из-за чего результаты получаются неправильными. Решение указанной задачи ищут, как правило, с использованием методов нелинейного программирования. Среди альтернативных методов, наибольшее распространение получили следующие: метод вершин, DSW-метод и ограниченный DSW-метод. Рассмотрим кратко метод вершин [56].

Метод базируется на подходах, используемых в нелинейном программировании. Ключевым утверждением, используемым в методе, является следующее: в классе бинарных алгебраических операций для двух нечетких чисел $K= I^*J$ оптимальная пара (x, y) получается в предположении $\mu_I(x) = \mu_J(y)$. Это условие вместе с алгебраическим соотношением $x^*y = z$ определяет функцию принадлежности решения. Вместо проведения этих вычислений аналитически для поиска величин z предлагается поиск значений $\mu_K(z)$, где K – желаемый результат. Возможна обработка с использованием α-срезов для K, в сопоставлении их с соответствующими оптимальными α-срезами для I и J. Алгоритм включает следующие шаги:

1. Выбор величины α где $0 \le \alpha \le 1$.

2. Поиск интервалов в X и Y, которые соответствуют этому α. Это есть α-срезы для I и J соответственно.

3. Поиск интервала в K, который соответствует интервалам в X и Y соответственно. Этот интервал есть α-срез K.

4. Повторение этих операций для различных значений α с целью получения других α-срезов решения *K*.

Программная реализация операций над нечёткими множествами совместно с реализацией принципа расширения позволяет производить вычисления с нечёткими переменными и решать задачи оценки надежности и риска.

3.7.2.5. Формальное описание риска в нечетких моделях

Термин "риск" имеет различные толкования в литературе, и в него зачастую вкладывают различное содержание. Общим, пожалуй, является представление о риске, как о величине, отражающей неуверенность эксперта в том, произойдет ли данное событие (нежелательное), и возникнет ли данное неблагоприятное состояние. Иначе можно определить риск как действие в условиях неопределенности. Неопределенность (недостаток) информации роднит риск с ситуацией принятия решений в условиях недетерминированных параметров. Учитывая необходимость в количественных оценках риска, разумно определить риск на основе сочетаний величины события (последствия события) и меры возможности его наступления. На практике для получения точечной оценки значения риска используют произведение их численных значений. При этом, в качестве меры возможности наступления события, как правило, выбирают вероятность его наступления *P*. Последствия нежелательного события *A* могут оцениваться различными специфическими параметрами – от экономических до этических или политических. Отсюда риск

$$R = A \cdot P. \qquad (3.52)$$

Обобщением формулы (3.51) на непрерывный случай является выражение

$$R_z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} A_x(x) \cdot P_y(z/x) \cdot (1/x)dx, \qquad (3.53)$$

где $P_y(.)$ – некоторая вероятностная мера в пространстве событий $[A_{min}, A_{max}]$.

Переход к нечетким моделям предполагает наличие широкого спектра вариантов агрегирования величины события и меры возможности его наступления. Возможными вариантами обобщения для подобной модели являются [57]:

1. Использование Т-норм для оценки степени уверенности в истинности формулы (3.52).
2. Замена значений *A* и *P* в (3.52) на нечеткие числа (лингвистические переменные), а произведения – на расширенное (по принципу обобщения) произведение нечетких чисел.
3. Замена значений A и *P* на нечеткие отношения, а произведения в (3.52) – на композицию этих отношений.
4. Обобщение формулы с использованием нечетких интегралов.

Рассмотрим схематично эти варианты.

1. *Использование Т-норм для оценки степени уверенности в истинности формулы (3.52).*

Формула (3.52) может иметь нестрогий характер в связи с тем, что значения вероятности *P* и ущерба *A* могут быть известны не точно, а с некоторыми степенями уверенности $x(P)$ и $y(A)$. Наша степень уверенности $z(R)$ в истинности формулы (3.52) может зависеть от степеней уверенности $x(P)$ и $y(A)$ следующим образом:

как их минимум – Т-норма Заде:

$$z(R) = T_M(x(P), y(A)) = \min[x(P), y(A)]; \qquad (3.54)$$

- как их произведение – вероятностная Т-норма:

$$z(R) = T_P(x(P), y(A)) = x(P) \times y(A); \qquad (3.55)$$

- как их ограниченная сумма – Т-норма Лукасевича:

$$z(R)=T_L(x(P),y(A)) = \max(0, x(P)+y(A)-1). \quad (3.56)$$

Возможно использование и других известных Т-норм.

2. *Замена значений A и P на нечеткие числа (лингвистические переменные), а произведения – на расширенное по принципу обобщения произведение нечетких чисел.*

Формула (3.52) перепишется в этом случае следующим образом:

$$\underline{R} = \underline{A} \otimes \underline{P} \Leftrightarrow \mu_{\underline{R}}(z) = \max_{z = x \times y} \{\min[(\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{P}}(y)]\}. \quad (3.57)$$

Здесь R, A и P – нечеткие числа; $\mu_R(z)$, $\mu_A(x)$ и $\mu_P(y)$ – функции принадлежности, характеризующие степени принадлежности элементов z, x и y к нечетким множествам R, A и P соответственно; $\otimes$ – операция расширенного произведения нечетких чисел; $\wedge$ – операция min (дизъюнкция) ; $\vee$ – операция max (конъюнкция). Необходимо отметить, что известны и другие принципы расширения. Их рассмотрение обычно увязывают с проблемой "взаимодействия" и "компенсации" переменных.

3. *Замена значений R, A и P на нечеткие отношения, а произведения в (3.52) – на композицию этих отношений.*

Нечетким отношением [53] называется нечеткое множество R на декартовом произведении A×B базовых множеств:

$$\mu_{\underline{R}}(x,y) = \mu_{\underline{A}\times\underline{B}}(x,y) = \min[\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(y)]. \quad (3.58)$$

Формула (3.52) перепишется с использованием операции композиции следующим образом:

$$\underline{R}(x,y) = \underline{A}(x,y) \circ \underline{P}(x,y). \quad (3.59)$$

Здесь $R(x,y)$, $A(x,y)$ и $P(x,y)$ – некоторые нечеткие отношения, а $\circ$ – операция композиции. Среди известных операций композиции наиболее часто используются операции max-min и max-product, т.е.

$$\mu_{\underline{R}}(x,y) = \max\{\min[\mu_{\underline{A}}(x,y), \mu_{\underline{P}}(x,y)]\}, \quad (3.60)$$

и

$$\mu_{\underline{R}}(x,y) = \max\{[\mu_{\underline{A}}(x,y)\cdot\mu_{\underline{P}}(x,y)]\} \quad (3.61)$$

соответственно.

Можно предложить также max-T композицию нечетких отношений, где T – параметрическая Т-норма.

Отношения $R(x,x)$, $A(x,y)$ и $P(y,x)$ могут быть интерпретированы как отношения моделирования, т.е. $X = (x_1, \ldots, x_N)$ – некоторый универсум, возможно, нормированный, $X_{\text{norm}} = [0,1]$, $x_1, \ldots, x_N \in [0,1]$, $Y = (y_1, \ldots y_K)$ – названия (номера) элементов терм-множества лингвистических переменных, выражающих нечеткие значения величин R, A и P. Нормировка X (преобразование в универсальную шкалу) осуществляется специальным монотонным преобразованием $F: X \to [0,1]$, в простейшем случае $F(x) = x / |X|$.

4. *Обобщение формулы (3.52) с использованием нечетких интегралов.*

Расширение формулы (3.52) с помощью параметрических Т-норм приводит к нечеткой интерпретации формулы (3.53) через свертку Т-нормы от распределения возможностей последствия нежелательного события A – μ_A и вероятностной меры P:

$$R(x) = \int T(\mu_A(x), P(x))\,dx. \quad (3.62)$$

Возможно также использование в качестве нечеткой интерпретации формулы (3.53) интегралов Сугено и Шоке [53].

Пусть $X = (x_1, \ldots, x_N)$. Пусть P – нечеткая мера на X. Тогда риск можно определить, как интеграл Сугено от функции A: $X \to [0,1]$ по отношению к мере P

$$R(x) = (S)\int A \circ P = \bigcup_{i=1}^{N} (A(x_{(i)}) \wedge P(A_{(i)})). \qquad (3.63)$$

Здесь (i) обозначает, что индексы упорядочены таким образом, что $0 \le A(x_{(1)}) \le \ldots \le A(x_{(N)}) \le 1$ и $A_{(i)} = \{x_{(i)}, \ldots, x_{(N)}\}$.

Риск можно также определить как интеграл Шоке от функции A: $X \to R$ по отношению к мере P

$$R(x) = (C)\int AdP = \sum (A(x_{(i)}) - A(x_{(i-1)}))P(A_{(i)}), \qquad (3.64)$$

с теми же обозначениями, что и выше, и $A(x_{(0)}) = 0$.

Функция принадлежности риска μ_R полностью характеризует риск как нечеткую величину. Из нее можно получить дефаззифицированное значение риска, например, наиболее возможное его значение, а также разброс значений риска.

3.7.2.6. Использование качественной информации в оценке риска

Понятие лингвистической переменной

Одним из возможных и, пожалуй, наиболее интересных применений аппарата нечетких множеств в области оценки риска является его способность оперировать с качественными понятиями путем использования лингвистических переменных (лингвистических термов) [58]. Подобные переменные дают возможность использовать естественный (или искусственный) язык для получения количественных результатов. Пусть X – пространство естественного языка (лингвистических термов), а Y – пространство (познавательной) интерпретации этих термов (рис. 3.2). Эти интерпретации, как правило, будут нечеткими, расплывчатыми и наиболее естественно для их описания использовать нечеткие множества. Таким образом,

лингвистические термы можно описывать с использованием нечетких множеств. Предположим, что мы задали определенный лингвистический терм в пространстве естественного языка X как α и нечеткое множество $\underline{A}$ в пространстве интерпретации, или значений Y, как определенное значение (функцию) терма α. Следовательно, естественный язык можно рассматривать как отображение $\underline{M}$ множества лингвистических термов из X в соответствующее множество интерпретаций, определенных в пространстве Y. Каждый лингвистический терм α из X соответствует нечеткому множеству $\underline{A}$ в Y, являющемуся интерпретацией α. Это отображение можно обозначить как $\underline{M}(\alpha,\underline{A})$.

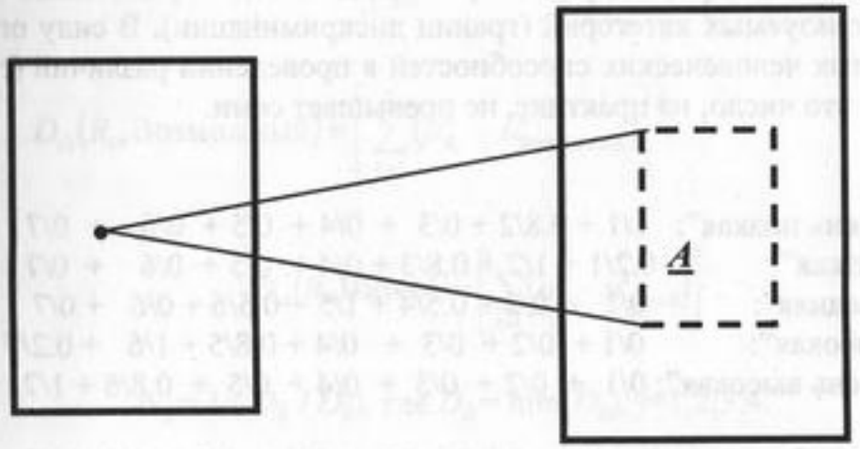


Рис. 3.2. Понятие лингвистической переменной

Нечеткое множество описывает нечеткость в отображении между лингвистическим термом и его интерпретацией и может быть представлено как функция принадлежности $\mu_{\underline{M}}(\alpha,y)$ или, проще, как

$$\mu_{\underline{M}}(\alpha,y) = \mu_{\underline{A}}(y). \qquad (3.65)$$

Лингвистические термы могут быть эффективно использованы для описания величины события A и меры возможности его насту-

пления P при оценках риска, когда количественная информация отсутствует, и эксперты могут дать только качественные оценки.

Таким образом, нечеткие модели оценки риска позволяют получать количественные оценки риска в случае нечеткой, неопределенной, а также качественной информации.

Лингвистические термы могут быть эффективно использованы для описания величины события A и меры возможности его наступления P при оценках риска, когда количественная информация отсутствует, и эксперты могут дать только качественные оценки. Как указано выше, этим термам могут быть сопоставлены соответствующие функции принадлежности. Типичные функции принадлежности для описания A и P приведены ниже (в обозначениях Заде). При их построении учтены рекомендации об ограничении числа используемых категорий (границ дискриминации). В силу ограниченных человеческих способностей в проведении различий (градаций) это число, на практике, не превышает семи.

P:
"Очень низкая": 1/1 + 0.8/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0/6 + 0/7
"Низкая": 0.2/1 + 1/2 + 0.8/3 + 0/4 + 0/5 + 0/6 + 0/7
"Средняя": 0/1 + 0/2 + 0.5/4 + 1/5 + 0.5/6 + 0/6 + 0/7
"Высокая": 0/1 + 0/2 + 0/3 + 0/4 + 0.8/5 + 1/6 + 0.2/7
"Очень высокая": 0/1 + 0/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0.8/6 + 1/7
A:
"Пренебрежимые": 1/1 + 0.8/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0/6 + 0/7
"Незначительные": 0/1 + 0.2/2 + 1/3 + 0.8/4 + 0/5 + 0/6 + 0/7
"Критические": 0/1 + 0/2 + 0/3 + 0.8/4 + 1/5 + 0.2/6 + 0/7
"Катастрофические": 0/1 + 0/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0.8/6 + 1/7

Выбрав термы для P и A и проведя вычисления по формуле (3.57) над соответствующими им функциями принадлежности, получим функцию принадлежности риска $\mu_{R_i}^k$, (k=1,2,…,7 – число членов в каждой функции принадлежности). Сопоставив ее с набором опорных функций, соответствующих реперным термам риска («Высокий», «Значительный», «Возможный», «Низкий»), например, с использованием среднеквадратичного критерия, можно сде-

лать вывод о степенях отклонения риска от этих термов, либо соотнести риск с ближайшим термом (в смысле выбранного критерия). Ниже приведен пример подобного расчета. Меры отклонения D_{ij} функции принадлежности риска $\mu_{R_i}^k$, полученной расчетом, от функций принадлежности опорных значений риска:

$$D_{i1}(R_i, \text{Высокий}) = \left[\sum_{k=1}^{7}\left(\mu_{R_i}^k - \mu_{\text{Высокий}}^k\right)\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{3.66}$$

$$D_{i2}(R_i, \text{Значительный}) = \left[\sum_{k=1}^{7}\left(\mu_{R_i}^k - \mu_{\text{Значительный}}^k\right)\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{3.67}$$

$$D_{i3}(R_i, \text{Возможный}) = \left[\sum_{k=1}^{7}\left(\mu_{R_i}^k - \mu_{\text{Возможный}}^k\right)\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{3.68}$$

$$D_{i4}(R_i, \text{Низкий}) = \left[\sum_{k=1}^{7}\left(\mu_{R_i}^k - \mu_{\text{Низкий}}^k\right)\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{3.69}$$

$$\alpha_{ij} = 1/(D_{ij} / D_{ij}), \text{ где } D_{ij} = \min(D_{ij}), j=1,2,3,4. \tag{3.70}$$

Степень доверия к тому, что R_i принадлежит к j-му реперному терму риска:

$$\beta_{ij} = \alpha_{ij} / \sum_{k=1}^{4} \alpha_{ik}, \tag{3.71}$$

$$\sum_{j=1}^{4} \beta_{ij} = 1. \tag{3.72}$$

Таким образом, нечеткие модели оценки риска позволяют получать количественные оценки риска в случае нечеткой, неопределенной, а также качественной информации.

3.7.3. Нечетко-вероятностные модели

На практике, как правило, риск является функцией как статистических параметров, так и нечетких. В силу различия теорий, используемых для описания этих двух типов параметров, (теория вероятностей и, например, теория возможностей) задача их агрегирования становится нетривиальной.

Со времени появления теории возможностей [50] предпринимались попытки точно обозначить соотношение между вероятностью и возможностью. Направление этих усилий обусловлено выбором одной из двух предпосылок. Первая исходит из того, что вероятность и возможность выражают фундаментально различные типы информации и неопределенности. Как следствие, предполагается направить усилия не на поиск возможных преобразований между двумя теориями, а на способ рассмотрения согласованности информации, представленной формализмом вероятности и возможности.

Конкурирующая предпосылка предполагает, что неопределенность может быть представлена в различных формах, но эти формы лишь различные проявления одного и того же понятия. Подобная позиция допускает возможность преобразований «вероятность – возможность», т.е. отображение между моделями, использующими теории вероятностей и возможностей. В соответствии с этими предпосылками возможны два подхода: проведение анализа разнотипных параметров или преобразование параметров к одному типу. В данном пособии рассмотрим более детально второй подход.

Он предполагает преобразование либо плотности распределения вероятностей $\boldsymbol{p}$ в распределение возможностей $\boldsymbol{r}$, либо, наоборот, $\boldsymbol{r}$ в $\boldsymbol{p}$.

При подобных преобразованиях должны выполняться некоторые условия (сохранения определенных свойств распределений). В зависимости от уровня требований к сохранению этих свойств и

будет определяться возможность или невозможность преобразования.

Из литературы известны различные типы преобразований, отличающихся философией. Например, Dubois и Prade [59] предложили преобразование «вероятность – возможность», базирующееся на понятии необходимости события. Отметим, что возможность Π события A и необходимость N противоположного ему события $\overline{A}$ связаны соотношением

$$\Pi(A) = 1 - N(\overline{A}). \tag{3.73}$$

Geer и Klir [59] предложили семейство преобразований, базирующихся на принципе инвариантности неопределенности, т.е. на предположении, что количество неопределенности (или информации) в распределении до преобразования и после должно остаться тем же. Требование, чтобы $\boldsymbol{p}$ и $\boldsymbol{r}$ содержали одинаковое количество информации формально описывается уравнением (3.74). Выражение в левой части уравнения представляет энтропию Шеннона (неопределенность в вероятностном распределении). Выражение в правой части представляет полную неопределенность распределения возможностей (сумму мер неспецифичности и дискорта):

$$\begin{aligned} -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2(p_i) = \sum_{i=2}^{n} r_i \log_2[i/(i-1)] - \\ -\sum_{i=1}^{n-1} (r_i - r_{i+1}) \log_2[1 - i \sum_{j=i+1}^{n} r_j/(j(j-1))]. \end{aligned} \tag{3.74}$$

Для заданного пространства рассуждений (m, F) мера неспецифичности, содержащаяся в m, выражается формулой

$$NS(m) = \sum_{A \in F} m(A) \log_2 |A|, \tag{3.75}$$

где $|A|$ есть размерность множества A; F – набор фокальных элементов, ассоциированных с m; m – базовое распределение вероятностей: функция, вводимая в теории Демпстера – Шеффера m: $P(X)\rightarrow[0,1]$, так что $m(\varnothing)=0$ и

$$\sum_{A\in F} m(A) = 1, \tag{3.76}$$

$X=\{x_1,x_2,...,x_n\}$ – ограниченное непустое универсальное множество, $P(X)$ – его мощность. Любое множество $A\in P(X)$, для которого $m(A)\neq 0$ – называется фокальным элементом.

Диапазон изменения меры $NS(m)$

$$0 \le NS(m) \le \log_2|X|. \tag{3.77}$$

$NS(m) = 0$ если все фокальные элементы являются синглетонами; $NS(m) = \log_2|X|$ если $m(X) = 1$.

Величина $m(A)$ выражает степень доверия в утверждении, которое представлено множеством A, но она не включает возможную степень доверия в дополнительных утверждениях, представленных различными подмножествами A. То есть, $m(A)$ выражает степень доверия, которая соответствует точно множеству A, а не степень полного доверия, соответствующего A. Чтобы получить последнее, необходимо к $m(A)$ добавить значения $m(B)$ для всех подмножеств В множества A. Полное доверие, соответствующее A, выражается формулой $\mathrm{Bel}(A)=\sum_{B\in A} m(A)$. В теории возможностей мера неспецифичности может быть выражена через распределение возможностей $r(r_1,r_2,...,r_n)$ посредством формулы (первое слагаемое правой части формулы (3.74))

$$NS(r) = \sum_{i=1}^{n} r_i \log_2(i/(i-1)). \tag{3.78}$$

Вторая мера неопределенности – дискорт – выражается формулой

$$D(m) = -\sum_{A\in F} m(A)\log_2\Big(\sum_{B\in F} m(B)|A\cap B|/|B|\Big). \tag{3.79}$$

Диапазон изменения D в формуле (3.79)

$$0 \le D(m) \le \log_2|X|. \tag{3.80}$$

$D(m) = 0$, если $m(A) = 1$ для одного отдельного множества A; $D(m) = \log_2|X|$, если m есть однородное распределение вероятностей на X. В теории возможностей дискорт может быть выражен через распределение возможностей $r(r_1,r_2,...,r_n)$ посредством формулы (второе слагаемое правой части формулы (3.74))

$$D(m) = -\sum_{i=1}^{n-1}(r_i - r_{i+1})\log_2[1 - i\sum_{j=i+1}^{n} r_j/(j(j-1))]. \tag{3.81}$$

Второе условие выражает принцип нормализации распределения возможностей:

$$r_1 = 1,\ (r_i \ge r_{i+1} \text{ для всех } i = 1, 2, \ldots, n-1). \tag{3.82}$$

Эти два условия (инвариантность неопределенности и нормализация распределения возможностей) можно считать минимальным набором требований к преобразованиям между вероятностью и возможностью.

Простейшее преобразование, предложенное Клиром, – линейное преобразование, осуществляющее преобразование распределения вероятностей p_i в распределение возможностей r_i в линейной шкале

$$r_i = \alpha p_i + \beta, \tag{3.83}$$

где $i = 1,2, \ldots, n$; α и β константы ($\alpha > 0$).

Авторами работы [60] было показано, что обратное линейное преобразование от распределения возможностей к распределению вероятностей существует не всегда. Другое преобразование, пред-

ложенное Клиром, – логарифмическое преобразование, удовлетворяющее минимальный набор требований в обоих направлениях:

$$r_i = \beta\,(p_i)^{\alpha}, \tag{3.84}$$

где $i = 1,2, \ldots, n$; α и β положительные константы.

В публикации [61] для осуществления преобразований использована известная в теории Демпстера–Шейфера мера неопределенности. Она определяется как максимальная величина энтропии Шеннона среди всех распределений вероятностей, совместимых с данной функцией доверия:

$$AU(\mathrm{Bel}) = \max\{-\sum_{x\in X} p_x \log_2 p_x\}, \tag{3.85}$$

где $AU(\mathrm{Bel})$ – количество неопределенности, содержащееся в функции доверия Bel, определенной на X, p_x – функция распределения вероятностей, максимум берется среди всех $\{p_x\}_{x\in X}$, так что $p_x \in [0,1]$ для всех $x\in X$, $\sum_{x\in X} p_x = 1$, и для всех $A\subseteq X$, $\mathrm{Bel}(A) \le \sum_{x\in A} p_x$. $X=\{x_1,x_2,\ldots,x_n\}$ – ограниченное непустое универсальное множество с мощностью $P(X)$, A – подмножество множества X. Отметим, что теория Демпстера – Шейфера включает теорию вероятностей и теорию возможностей как составные части.

В силу не единственности преобразования "вероятность-возможность" используется дополнительно еще одна мера неопределенности – неспецифичность NS. В зависимости от контекста задачи выбирается решение, минимизирующее или максимизирующее значение ***r***. Например, если распределение возможностей предполагается использовать для принятия решений, целесообразно стремиться к максимальной точности – наиболее характерному решению – максимально специфичному (минимальная неспецифичность). В случаях, когда распределение возможностей предполагается использовать для последующего анализа, ограничения, накладываемые на него, должны быть лишь необходимыми и, следовательно, целесообразно использовать максимально неспецифичное решение (максимальное значение неспецифичности).

3.7.4. Оценка риска с использованием лингвистических переменных

Основная цель анализа и оценки риска заключается в предоставлении информации об уровне безопасности рассматриваемой системы лицу, принимающему решения. Использование экспертного опроса и применение лингвистических переменных в задачах оценки риска дает возможность определения уровня безопасности для объектов, информация о которых может быть выражена скорее качественными, чем количественными категориями.

Под ущербом обычно понимают спектр возможных последствий аварии. Применительно к объектам ядерного топливного цикла целесообразно рассматривать такие возможные последствия, как материальный ущерб M, гуманитарный ущерб G и радиоактивное загрязнение местности Z. В нашем рассмотрении M, G, Z и P являются лингвистическими переменными.

Экспертная оценки риска состоит из следующих этапов [62]:

1. Предварительный этап. В него входят: анализ причин и факторов развития аварии; определение основных сценариев развития аварии; определение видов ущербов, ранжирования возможности и тяжести последствий аварии.
2. Этап экспертного опроса. Он состоит из следующих мероприятий: составление опросного листа; подбор группы экспертов; опрос экспертов.
3. Расчетный этап. Он включает в себя: анализ результатов экспертного опроса; оценку риска на основе экспертного опроса.
4. Заключительный этап. Он представляет собой анализ оценки риска.

Рассмотрим кратко все этапы.

Первый начинается с подробного анализа исследуемого опасного объекта. При этом, как правило, разбивают объект на составляющие части и для каждой из них проводят анализ причин и факторов возможного возникновения аварийных ситуаций. Среди них выделяют следующие группы: причины и факторы, связанные с

отказом оборудования; причины и факторы, связанные с ошибками человека; причины и факторы, связанные с внешним воздействием.

На основе проделанного анализа определяют сценарии развития возможных аварий.

Следующим шагом является определение видов возможных ущербов, ранжирование возможности и тяжести последствий аварий с использованием лингвистических переменных L.

Для проведения экспертного опроса предлагается вариант ранжирования возможности и тяжести последствий аварий (табл. 3.1).

На основе выбранных сценариев и проведенного ранжирования составляется опросный лист эксперта.

Вторым этапом является экспертный опрос – заполнение опросных листов. Его участники должны отвечать минимальному набору предъявляемых требований: высокому уровню общей эрудиции, высокому профессиональному уровню в оцениваемой области, способности перспективно мыслить и наличию производственного и исследовательского опыта в данной области. В ходе опроса эксперт выражает степень своей уверенности (числом от 0 до 1) в том, что при реализации рассматриваемого сценария возможность и последствия аварии соответствуют ранжированным значениям.

Следующий шаг – построение функций принадлежности $\mu(x)$ лингвистических переменных P, M, G, Z на основе экспертной оценки:

$$\mu_{lk}\left(x_i^{lk}\right)=\frac{\sum_{j=1}^{m} x_{ij}^{lk}}{m}, \qquad (3.86)$$

где i=1, 2,..., n, n – число значений переменной (в нашем случае n=7); j=1, 2,…, m, m – число экспертов; x_{ij}^{lk} – оценка j-м экспертом i-го значения переменной для l-й лингвистической переменной k-го сценария; l=1,2,3,4 – вид лингвистической переменной (P, M, G, Z); k=1, 2,..., r, r – число рассматриваемых сценариев.

При количестве экспертов в группе более десяти проводится проверка согласованности мнений экспертов. Для этого используется коэффициент конкордации Кендала (коэффициент согласия).

Далее, с помощью операции max-min находится функция принадлежности материального, гуманитарного и радиационного рисков:

$$\mu_{R_{lk}}(z^{lk}) = \max_{z^{lk}=x^{lk}\cdot x^{1k}} (\min(\mu_{lk}(x^{lk}), \mu_{1k}(x^{1k}))), \qquad (3.87)$$

где l=2,3,4 – вид риска (R_M, R_G, R_Z).

Функция принадлежности полного риска для k-го сценария находится с использованием max-min операции:

$$\mu_{R_k}(z^k) = \max_{z^k=z^{2k}+z^{3k}+z^{4k}} (\min(\mu_{R_{2k}}(z^{2k}), \mu_{R_{3k}}(z^{3k}), \mu_{R_{4k}}(z^{4k}))). \qquad (3.88)$$

Расчет результирующего риска системы также проводится с использованием max-min операции:

$$\mu_R(z) = \max_{z=z^1+z^2+\ldots+z^r} (\min(\mu_{R_1}(z^1), \mu_{R_2}(z^2),\ldots, \mu_{R_r}(z^r))). \qquad (3.89)$$

Последний этап заключается в анализе полученных результатов и оценке уровня безопасности объекта.

Для оценки уровня безопасности функция принадлежности полученного результирующего риска сравнивается с функциями принадлежности опорных уровней риска, например, с использованием евклидового расстояния. В качестве лингвистических значений опорных значений риска могут выступать: критический риск–R_0^1; приемлемый риск–R_0^2; пренебрежимый риск–R_0^3. Их функции принадлежности могут быть построены, например, в соответствии с табл. 3.2.

Эвклидово расстояние D_m (m=1,2,3) между нечеткой величиной риска R и выбранными опорными уровнями для риска R_0^m определяется как

$$D_m\left(R, R_0^m\right) = \left[\sum_{j=1}^{7}\left(\mu_R^j - \mu_{R_0^m}^j\right)\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (3.90)$$

Чем меньше расстояние D_m, тем ближе значение риска R к значению, определяемому m-м опорным значением. Если риск в точности соответствует опорному значению, то D_m=0.

Введем относительное расстояние

$$\alpha_m = 1/(D_m / D_{m0}), \qquad (3.91)$$

где D_{m0} есть наименьшее среди полученных значений D_m.

Если D_m = 0, то соответствующее α_m = 1, а остальные равны 0. α_m нормируется в соответствии с соотношением

$$\beta_m = \alpha_m / \sum_{k=1}^{3}\alpha_k, \qquad (3.92)$$

β_m можно интерпретировать как степень доверия к тому, что R принадлежит к m-му опорному значению риска R_0^m. Если R в точности соответствует R_0^m, то соответствующее β_m=1, а остальные равны 0. Отметим, что

$$\sum_{j=1}^{3}\beta_j = 1. \qquad (3.93)$$

По полученным результатам делается вывод о безопасности объекта. Метод целесообразно применять к оценке риска тех опасных объектов, информация о которых содержит неопределенности.

Таблица 3.1

L	P	M	G	Z
Многочисленные	>1 случая / год	>500 тыс. МРОТ	Погибло более 10 человек, есть пострадавшие	Большой выброс радиоактивных веществ $>10^{16}$Бк. Облучение персонала летальными дозами. Крупномасштабные воздействия на население и окружающую среду. Разрушение зданий
Отдельные	$1\text{-}10^{-1}$ случаев/год	250-500 тыс. МРОТ	Погибло от 1 до 10 человек, есть пострадавшие	Значительный выброс радиоактивных веществ до 10^{16} Бк. Возможно облучение персонала летальными дозами. Разрушение части технологических систем
Единичные	$10^{-1}\text{-}10^{-2}$ случаев/год	50-250 тыс. МРОТ	Погиб 1 человек, есть пострадавшие	Ограниченный выброс радиоактивных веществ до 10^{15} Бк. Острое облучение части персонала. Облучение ограниченной части населения сверх допустимых пределов. Разрушение отдельных установок
Возможные	$10^{-2}\text{-}10^{-3}$ случаев/год	15-50 тыс. МРОТ	Никто не погиб, есть серьезно пострадавшие	Незначительный выброс радиоактивных веществ. Возможно острое облучение части персонала. Облучение части населения на уровне допустимых доз. Повреждение конструкций
Маловероятные	$10^{-3}\text{-}10^{-4}$ случаев/год	5-15 тыс. МРОТ	Нет серьезно пострадавших, есть случаи ВПТ*	Выброс радиоактивных веществ выше установленных пределов. Облучение персонала выше дозовых пределов. Облучение части населения на уровне допустимых доз. Повреждение защитных конструкции
Редкие	$10^{-4}\text{-}10^{-5}$ случаев/год	0,5-5 тыс. МРОТ	Нет серьезно пострадавших, единичные случаи ВПТ*	Возможно облучение персонала выше дозовых пределов. Сохраняется глубокоэшелонированная защита
Уникальные	$<10^{-5}$ случаев/год	<0,5 тыс. МРОТ	Заметные последствия отсутствуют	Отклонения от нормального режима эксплуатации

* ВПТ означает временную потерю трудоспособности

Таблица 3.2

Опорные значения риска

Возможность аварийных ситуаций \ Ущерб	Катастрофический	Критический	Значительный	Серьезный	Незначительный	Малозначительный	Ничтожный
Многочисленные							
Отдельные							
Единичные							
Возможные							
Маловероятные							
Редкие							
Уникальные							

– критический
– приемлемый
– пренебрежимый

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984.
2. Yacovy. Haimes. Risk Modeling, Assessment and Management Second Edition, a John Wiley & Sons, INC., publication. 2004.
3. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. М.: Наука, 1989.
4. Субботин С. Риск как неизбежное и необходимое условие развития // Ядерное общество, 2000, №4. С. 20-23.
5. Ansell J., Wharton F. Risk, Analysis, Assessment and Management. – Wiley, 1992.
6. B. M. Ayyub. Risk Analysis in Engineering and Economics. – Chapman & Hall/CRC, 2003.
7. Александров Г., Шахманский Г. Устойчивость, безопасность, риск // Военные знания. 1993. № 11 – 12. С. 8-11.
8. Рац В.М., Слепцов Б.Г., Копылов Г.Г. Концепция обеспечения безопасности. М.: «Касталь», 1995.
9. Елагин Ю.П. Понятие «Безопасность» // Атомная энергия. 1996. Т.80. Вып. 6. С. 415-420.
10. Быков А.А., Порфильев Б.Н. Об анализе риска, концепциях и классификации рисков // Проблемы анализа риска. 2006. Т. 3. № 4. С. 319-336.
11. Безопасное взаимодействие человека с техническими системами: Учебное пособие / В.Л. Лапин, В.М. Попов, Ф.Н. Рыжков, В.И. Томаков, Курский гос. техн. университет. Курск: 1995.
12. Meister, D. (1977). Methods of Predicting Human Reliability in Man-Machine Systems. In S. Brown & J. Martin (Eds.). Human Aspects of Man-Machine Systems. Milton Keynes, UK: Open University Press.
13. Сынзыныс Б.И., Тянтова Е.Н., Мелехова О.П. Экологический риск: Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.В. Козьмина. М.: Логос, 2005.
14. J. J. Cohrssen, V.T. Covello – Risk Analysis: A Guide to Principles and Methods for Analyszing Health and Ennvironmental Risks, 1989.

15. Кузьмин И.И. Принципы управления риском // «Проблемы анализа риска». 2005. Т. 2. № 1. С. 73-93.
16. Our Common Future. The World Commission on Environment and Development. – Oxford New York: Oxford University Press, 1987.
17. Перелет Р.А. Выявление показателей устойчивого развития. Рабочий доклад. Программа Гарвардского института международного развития (ГИМР) – СНГ по политике в области окружающей среды. М.: ГИМР, 1996.
18. Евстафьев И.Б., Григорьев С.Г. К вопросу об оценке фонового риска // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1993. Вып. 3, С. 2-15.
19. Ковалев Е.Е. Концепция приемлемого риска как основа нормализации медико-экологической ситуации в алтайском крае // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1993. Вып. 6. С. 3-20.
20. Рекомендации МКРЗ. Публикация 60, М.: Энергоатомиздат, 1994.
21. Практическая реализация методологии ALARA на АЭС: Методическое пособие. М., 1999.
22. Стратегические риски России. Оценка и прогноз. Под ред. Ю.Л. Воробьева. М.: Деловой экспресс, 2005.
23. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. М.: Мир, 1990.
24. Федеральный закон Российской Федерации № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
25. Венская конвенция о гражданской ответственности за ядерный ущерб. Вена 21 мая 1963г.
26. Амелина М.Е., Иойрыш А.И., Молчанов А.С. Страхование гражданской ответственности за ядерный ущерб. М.: ИздАТ, 2000.
27. Методика оценки возможного экономического и экологического ущерба от реализации внутренних и внешних угроз на АЭС концерна "Росэнергоатом". М.: 2004.
28. Межотраслевая методика расчета экономического ущерба от радиационных аварий при использовании радиоактивных веществ в народном хозяйстве. Санкт-Петербург, 1998.

29. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций. М., 2004.
30. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса. М., 2003.
31. Клемин А.И. Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов, М.: Атомиздат, 1973.
32. Костерев В.В., Аверкин А.Н., Болятко В.В. Методы приближенных рассуждений в интеллектуальных системах оценки риска: Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, Санкт-Петербург. 2001. С. 180-185.
33. Modarres, M., 1993. What Every Engineer Should Know About Reliability and Analysis, Marcel Dekker, New York; Kumamoto, H. and Henley, E. J., 1996. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists, 2nd ed., IEEE Press, New York.
34. Eldukair, Z. A. and Ayyub, B. M., 1991. Analysis of Recent U.S. Structural and Construction Failures, ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 5(1), 57–73.
35. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007.
36. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. М.: Наука, 1973.
37. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99): Гигиенические нормативы. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999.
38. Risk Analysis: A Guide to Principles and Methods for Analyzing Health and Environmental Risks, 1989.
39. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications, McGraw-Hill, Inc., 1997.

40. Savage L.J., (1972) The Foundations of Statistics, Dover, New York.
41. Dempster A.P. Upper and Lower probabilities induced by a multivalued mapping//Ann. Math. Statist., 1967, 38, p. 325-339.
42. Shafer G. (1976) A mathematical theory of evidence. J. Roy Statist. Soc., 1968, B 30, p.205-247.
43. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // Fuzzy Sets and Systems, 1980, No 1, p. 3-28.
44. Zadeh, L.A. - Fuzzy sets - Information and control, 1965, v.8, p. 338-353.
45. Аверкин А.Н., Костерев В.В. Триангулярные нормы в системах искусственного интеллекта // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000, №5. С. 107-119.
46. Розенберг В.Я. Развитие концепции неопределенности в теории информационных систем//Сб. «Измерения, контроль, автоматизация», М.,1981. № 3. С. 53-63.
47. Gonella L. Proposal for a Revision of the Measure Theory and Terminology // Alta Frequenza, vol. XLIV, No 10, 1975.
48. Слаев В.А., Чуновкина А.Г. Различные подходы к описанию неопределенности данных при измерениях: Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, Санкт-Петербург. 1998. т. 2. С. 42-46.
49. Солопченко Г.Н., Резник Л.К. Предпосылки и функциональные требования к применению аппарата нечетких переменных для использования в практической метрологии и в теории измерений: Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, Санкт-Петербург. 1998. Т. 2, С. 33-36.
50. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей, М.: Радио и связь, 1990.
51. Ю.П. Пытьев. Возможность. Элементы теории и применения. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
52. Костерев В.В. Агрегирование вероятностной и нечеткой информации в задачах оценки риска // Инженерная физика. 2000. № 4. С.8-12.

53. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф. и др. Нечеткие множества в задачах управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986.
54. Klement, E.P., Mesiar, R. - Triangular norms - Tatra Mountains Math. Publ., 1997, p.p. 169-194.
55. Dubois D. and Prade H. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press, New York, 1980, p.36.
56. Dong, W. and Wong, F.S. – The Vertex Method and its Use in Earthquake Engineering, First Int. Symp. On Fuzzy Math. In Earthq. Research, Seismology Press, China, 1985.
57. Averkin A.N., Kosterev V.V. Triangular Norms in Artificial Intelligence Systems // Journal of Computer and System Sciences International. 2000. Vol. 39, pp. 772-782.
58. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений.М.: Мир. 1976.
59. Dubois D. and Prade H. – Unfair Coins and Necessity Measures: Towards a Possibilistic Interpretation of Histograms. – Fuzzy Sets and Systems, 1983, vol.10, p.p. 15-20.
60. Geer J.F., Klir G.J. – A Mathematical Analysis of Information-Preserving Transformations Between Probabilistic and Possibilistic Formulations of Uncertainty – Int. J. of General Systems, 1992, Vol. 20, No. 2, p. 143 – 176.
61. Harmanec D., Klir G.J. - On Information - Preserving Transformations. - Int. J. General Systems, 1997, Vol. 26(3), pp. 265-290.
62. Костерев В.В., Лапшина В.А. Метод экспертной оценки риска с использованием лингвистических переменных: Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2003. Санкт - Петербург, 25 - 27 июня. 2003. С. 112-115.
63. Klyatis L.M., Klyatis E.L. Accelerated Quality and Reliability Solution, Elsevier, 2006.

Владимир Викторович Костерев

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ

Учебное пособие

Редактор Н.В. Шумакова

Подписано в печать 01.09.08. Формат 60x84 1/16
Печ.л. 17,5. Уч.-изд.л. 17,5. Тираж 150 экз.
Изд. № 1/5. Заказ № 1-2053

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет).
115409, Москва, Каширское ш., 31

Типография издательства «Тровант».
г. Троицк Московской области